ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES
ALINE MARA OLIVEIRA
OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 23

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 23

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 23/ Organizadores:Aline Mara Oliveira,Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2025

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-599-1
DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação. I. OLIVEIRA, Aline Mara II. GUIMARÃES,Osvaldo Sena III. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Análise da integração da simulação, inteligência artificial e logística: um estudo bibliométrico 07

Edilaine Duarte Teixeira, Julia Gomes de Carvalho, Caio Oliveira Xavier, Francisco Santos Sabbadini

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.01

Capítulo 2: Digital image analysis applications using neural networks in colorimetry and textile industry 18

Yasmim Ribeiro Meirelles, Lisbeth Zelayaran Melgar, Jorge David Alguiar Bellido

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.02

Capítulo 3: Predictive analysis in cancer treatment. A case study at Brazilian National Cancer Institute 31

Antonio Augusto Gonçalves, Francisco Santos Sabbadini

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.03

Capítulo 4: Plataforma didática integrada baseada em microcontrolador para experimentos em eletrônica digital e analógica 44

Alan Marques da Rocha, Antonia Alana Claudino Sousa

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.04

Capítulo 5: Desenvolvimento de uma plataforma para comunicação entre dispositivos industriais nos padrões Modbus e Ethernet 53

Matheus Horta de Paula, Mário Cupertino da Silva Júnior, Marcos Vinícius Lopes Pereira, Michel Carlo Rodrigues Leles, Adson Andrade Barros, Nara Silveira Velloso, Luis Gustavo Figueiredo França

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.05

Capítulo 6: Máquinas Elétricas Rotativas: ensaios e simulações computacionais 69

Allan David da Costa Silva, Igor Cavalcante Torres, Amanda Santana Peiter, Alana Kelly Xavier de Barros Branco, Estevão de Lima Malta da Silva, Carlos Eduardo Ribeiro da Silva Pereira, José Nilton Vieira dos Santos Junior

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.06

Capítulo 7: Avaliação do comportamento de Argamassas de Hidratação Controlada (AHC) contendo adição de EVA (Etileno Acetato de Vinila) 94

Rian Campos Almeida, Maria Eduarda do Nascimento Souto, Jhennifer Larissa de Barros Silva, Gabriel Nunes Ferreira de Araujo, Aline Figueiredo da Nóbrega

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Determinação de íons cobre (CU^{2+}) em cachaças artesanais produzidas em Minas Gerais usando dispositivos de imagem digital como sensores 104

Priscila Mariz Santana Alves, Lisbeth Zelayaran Melgar, Jorge David Alguiar Bellido

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.08

Capítulo 9: Estudo da viabilidade técnica na utilização de solos como camadas de pavimento na cidade de Sousa/PB 116

Mayla Estrela Braga, Eduardo Morais de Medeiros, Francisca Alécia Leite Silva, André Luiz Lima de Andrade

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.09

Capítulo 10: Desempenho geotécnico de solo utilizado na camada de cobertura final de aterro sanitário 123

Melissa da Silva Leite, Maria Eduarda Menezes Evangelista, Rayanna Nathiely Silva Nascimento Nogueira, Adla Jamilly Vieira Felipe, William de Paiva

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.10

Capítulo 11: O uso de captações de tempo seco frente à universalização do esgotamento sanitário 133

Frederico Menezes Coelho

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.11

Capítulo 12: Rugosidade sob condições reais operacionais de coletores de esgotos 146

Frederico Menezes Coelho

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.12

Capítulo 13: Dinâmica de resfriamento de um arrefecedor evaporativo industrial em ambiente fechado 165

Brenno Evelim Lopes, Leôncio Diogenes Tavares Câmara

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.13

Capítulo 14: The transition from naphtha to natural gas as a feedstock in the brazilian petrochemical industry: challenges and opportunities..... 173

Antônio Lázaro Lobo de Almeida, João Ricardo de Andrade Machado, Verona Silva Benevides, Ronaldo Costa Santos

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.14

SUMÁRIO

Capítulo 15: Aferidor diametral automático via wi-fi e bobinador de filamentos 194

Rodrigo Hideki Kubo, Ludimila Kelly de Lima Moura, Joao Carlos Pereira Berto, Josefa Jakelyne Pereira de Medeiros, Lívia Maria Bezerra da Silva, Maria Eduarda Guedes dos Santos, Alexandre Magnus Fernandes Guimarães

DOI: 10.36229/978-65-5866-599-1.CAP.15

Autores 209

Capítulo 1

Análise da integração da simulação, inteligência artificial e logística: um estudo bibliométrico

Edilaine Duarte Teixeira
Julia Gomes de Carvalho
Caio Oliveira Xavier
Francisco Santos Sabbadini

Resumo: A convergência da Simulação, da Inteligência Artificial e da Logística é um tema emergente de pesquisa e desenvolvimento. Trata-se de três áreas do conhecimento distintas, porém que possuem interfaces e áreas de aplicação que se relacionam. O presente estudo descreve a evolução das publicações científicas, identifica stakeholders e patrocinadores de projetos nessas áreas de conhecimento. estas áreas de conhecimento e traça o perfil a partir do que foi identificado na compilação da literatura realizada nas bases Scopus e Web of Science. A abordagem metodológica da pesquisa foi a de estudo bibliométrico, com base nas buscas realizadas na base Scopus. Os resultados da pesquisa mostraram que a aplicação conjunta dos temas ainda está em estado embrionário, porém com interesse crescente.

Palavras-chave: simulação, logística, Inteligência Artificial, bibliometria.

1. INTRODUÇÃO

A área de logística tem sido impulsionada pelo rápido desenvolvimento da inteligência artificial (IA) e da simulação. A convergência dessas três disciplinas, logística, inteligência artificial e simulação, tem impacto na elevação da eficiência operacional em empresas e organizações de diversos setores.

A logística desempenha um papel fundamental na gestão dos fluxos de materiais, informações e finanças, contribuindo para que o planejamento da produção e entrega ao consumidor final seja efetiva. Cabe também considerar os desafios enfrentados pelas cadeias de suprimentos modernas são complexos, com variáveis interconectadas e demandas cada vez mais exigentes dos clientes, face aos quais as tecnologias de IA e simulação podem auxiliar.

É nesse contexto que a inteligência artificial emerge como um poderoso aliado. Por meio de algoritmos avançados e técnicas de aprendizado de máquina, a inteligência artificial é capaz de analisar grandes volumes de dados em tempo real, identificar padrões, prever demandas futuras e tomar decisões autônomas.

No mesmo sentido a simulação desempenha um papel crucial na validação e otimização dos processos logísticos. Por meio da criação de modelos virtuais que representam a realidade, a simulação permite testar diferentes cenários e estratégias, antecipar impactos e identificar oportunidades de melhoria. A combinação da simulação com a inteligência artificial possibilita a criação de ambientes de teste mais realistas e dinâmicos, tornando as simulações mais precisas e confiáveis.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é mapear os projetos financiados por patrocinadores e interessados nas áreas de conhecimento que envolvam simulação, logística e inteligência artificial.

A estrutura de desenvolvimento deste capítulo é composta de 5 seções, além dessa introdução, a segunda refere-se a fundamentação teórica a respeito da simulação, logística e inteligência artificial. Posteriormente, tem-se a metodologia utilizada para a pesquisa. A quarta seção traz os resultados obtidos e a discussão deles. Por fim a última seção contém as considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. SIMULAÇÃO

Segundo Sabbadini et all. (2017), a simulação consiste no processo de representar no ambiente computacional uma situação ou cenário de um ambiente real. Nesse sentido, conforme De Oliveira (1994) configura-se como uma ferramenta para análise de cenários e avaliação de alternativas para a tomada de decisão, que oferece a possibilidade de executar uma avaliação prévia do comportamento dinâmico de um sistema particular sem a necessidade da interferência no sistema real.

No mesmo sentido Junior e Ingalls (2018) afirmam que a simulação é a experimentação com um modelo, sendo este uma simplificação do sistema. O comportamento do modelo imita algum aspecto relevante do comportamento do sistema em estudo e o usuário experimenta o modelo para inferir esse comportamento. Essa estrutura geral é um componente relevante para o aprendizado relacionados a resolução de problemas, do projeto e de questões de controle.

Em termos de aplicação a simulação pode ser utilizada em diversos segmentos produtivos, conforme se pode verificar na figura 1. O repositório da Winter Simulation Conference, cobrindo o período de 1968 até 2024, contendo abordagens conceituais, tutoriais em diversos níveis, aplicações da simulação e estudos de caso, que podem ser baixados em arquivo formato .PDF, estão disponíveis em https://informs-sim.org/ .

Figura 1. Visão geral de áreas de conhecimento e aplicação da Simulação

Fonte: WSC, Archive. Disponível em https://informs-sim.org/wsc24papers/by_area.html , acesso 15 Out 2025.

2.2. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A IA tem uma trajetória de desenvolvimento que abrange mais de seis décadas, marcada por ciclos de estagnação temporária e avanços cruciais (ADORNO, 2021). De acordo com este autor as diversas análises sobre a IA exploram um amplo espectro de temas e áreas, assim como múltiplas possibilidades com destaque para: o ensino e o aprendizado de máquina, o domínio da mobilidade, incluindo rotas de trânsito e controle semafórico, e a ciência forense digital.

No Quadro 1 são apresentadas algumas definições e seu foco, permitindo conhecer um pouco mais a abrangência e a diversidade do tema.

Quadro 1 - Definições conceituais de IA

Autor (ano)	Definição	Foco Principal
ARARIBÓIA Appud SELLITO (2002), pp. 3.	"Campo que usa técnicas de programação para resolver problemas por intermédio de máquinas do mesmo modo que um ser humano os resolveria. As técnicas procuram imitar mecanismos da natureza por meio de mecanismos tecnológicos baseados em mecanismos naturais".	"Imitação do raciocínio humano por máquinas e imitação de mecanismos naturais".
NIKOPOULOS Appud SELLITO (2002), pp. 3.	"Campo de estudos multidisciplinar (computação, engenharia, psicologia, matemática e cibernética) cujo principal objetivo é construir sistemas que apresentem comportamento inteligente e desempenhem tarefas com grau de competência equivalente ou superior ao de um especialista humano".	"Natureza multidisciplinar e desempenho de tarefas com competência igual ou superior à humana".
McCARTHY Appud SELLITO (2002), pp. 3	"Ciência e tecnologia de construção de máquinas inteligentes, especialmente programas de computador. Relaciona-se com o uso de computadores para o entendimento e a exploração da inteligência humana, não se limitando a métodos biologicamente observáveis".	"Construção de máquinas e programas inteligentes, e entendimento/exploração da inteligência humana".

Fonte: Elaborado com base em Sellitto (2002).

Para os propósitos deste estudo o foco de interesse está diretamente associado a abordagem de Araribóia (Appud Sellito, 2002), dada a natureza projetual e processual da simulação e da logística.

2.3. LOGÍSTICA

A questão central relacionada à logística está diretamente relacionada com os processos de movimentação, produção e estocagem de materiais. Nesse sentido é um processo estrategicamente orientado para transferência, movimentação e armazenagem de materais, produtos acabados, componentes da origem, nos fornecedores, ao destino, nos clientes finais (Kobayashi, 2000).

Para Novaes (1989; 2004) a logística abrange mais elementos que apenas os aspectos físicos e estruturais dos sistemas, devendo-se considerar outros elementos como as informações, os fluxos e o gerenciamento do processo logístico como um todo, compreendendo diversificação de modais, custos de transporte e armazenagem, fluxo financeiro.

Para Ballou (2001) os níveis de qualidades exigidos pelos clientes devem ser considerados abordando-se a logística de uma forma mais ampla, a custo viável. Outros autores levam as questões de resultado como relevantes a exemplo de Cristopher (1997) e Daskin (1995), o primeiro tendo a logística como processo de gerenciamento de operações para minimizar os custos e o segundo numa perspectiva de planejamento das operações logística orientados para a economia.

Nesse sentido a otimização dos processos logísticos passa a ser um fator competitivo para a diferenciação das operações. A busca pelo melhor resultado se configura numa oportunidade que pode ser alcançada com o apoio da simulação, por meio da otimização dela.

3. METODOLOGIA

Para a identificação da utilização da Simulação e IA no setor de Logística, foi realizada uma revisão sistemática da literatura no Portal Capes Periódicos. O levantamento bibliométrico da literatura sobre o tema permitiu a delimitação e o mapeamento da estrutura existente de publicações científicas sobre a aplicação do conceito de Logística relacionado com simulação e IA.

3.1. ESCOPO E BASE DE BUSCA

Neste presente trabalho foram considerados apenas artigos publicados em língua inglesa entre os anos de 2018 a 2022. Para selecionar os artigos foram utilizadas as bases de dados SCOPUS devido a abrangência e relevância neste campo de pesquisa. Ademais, essas bases de dados permitem a seleção de periódicos.

3.2. DEFINIÇÃO DA AMOSTRA

A priori, para realizar a busca na base de dados buscou-se por palavras-chave que correlacionam a Simulação, Logística, Inteligência Artificial (AI) e Otimização. A pesquisa seguiu a seguinte lógica: (“simulation”) AND (“logistics”) AND (“AI”) AND (“optimization”). Desta busca foram eliminados os artigos duplicados nas duas bases de dados citadas anteriormente, resultando em 19 artigos.

Posteriormente, fez-se a leitura de todos os artigos para a extração dos resultados e análises de conteúdo. A leitura dos artigos foi relacionada a sanar as seguintes questões: quais os patrocinadores deste nicho de conhecimento? Como a logística se relaciona com a simulação juntamente com a IA? Como se dá a otimização de processos logísticos diante dessa simultaneidade?

4. RESULTADOS

A partir da análise dos dados, foram identificados 13 artigos publicados sobre a temática “Simulação - Inteligência Artificial - Logística - Otimização” no período de 2013 a 2023. Os trabalhos são apresentados no Quadro 2:

Quadro 2 – Artigos Científicos sobre o "AI - Simulação - Logística - Otimização" (2013 a 2023)

Ano	Artigo	Autores	Países
2023	AI-based energy-efficient path planning of multiple logistics UAVs in intelligent transportation systems	Du, Pengfei; He, Xiang; Cao, Haotong; Garg, Sahil; Kaddoum, Georges; Hassan, Mohammad Mehedi.	China, Canadá e Líbano
2023	Digital Twin-Based Automated Fault Diagnosis in Industrial IoT Applications	Alshathri, Samah; Hemdan, Ezz El-Din; El-Shafai, Walid; Sayed, Amged.	Arábia Saudita e Egito
2021	Deep Multi Agent Reinforcement Learning Based Decentralized Swarm UAV Control Framework for Persistent Surveillance	Lee, Jae-Woo Kaliappan, Vishnu Kuma; Nguyen, Tuan Anh; Jeon, Sang Woo; Min, Dugki.	Coreia do Sul
2022	Automatic grouping of production data in Industry 4.0: The use case of internal logistics systems based on Automated Guided Vehicles	Steclik, Tomasz; Cupek, Rafal; Drewniak, Marek.	Polônia
2022	MARS: scenarios monitoring and analysis system	Loznyuk O.A.; Martynov A.V.; Usachev V.D.	Rússia
2022	Camp Location Selection in Humanitarian Logistics: A Multiobjective Simulation Optimization Approach	Xue, Yani; Xue, Yani; Arabnejad, Hamid; Suleimenova, Diana; Jahani, Alireza; Geiger, Bernhard C.; Wang, Zidong; Liu, Xiaohui; Groen, Derek.	Reino Unido e Áustria
2022	Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals	Tsolakis, Naoum; Zissis, Dimitris; Papaefthimiou, Spiros; Korfiatis, Nikolaos.	Reino Unido e Grécia
2021	Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing	Yang, Hui; Rao, Prahalad; Simpson, Timothy; Lu, YanWitherell, Paul; Nassar, Abdalla R.; Reutzel, Edward; Kumara, Soundar.	Estados Unidos
2019	Methods of artificial intelligence in economical and logistical education	Udvaros, József; Gubán, Ákos; Gubán, Miklós.	Hungria
2016	An improved chaotic binary bat algorithm for QoS multicast routing	Meraihi, Yassine; Acheli, Dalila; Ramdane-Cherif, Amar.	Argélia e França

Fonte: SCOPUS. Elaborado pelos autores.

Além dos artigos foram identificados, o Quadro 2 destaca três eventos que trataram do tema no período de 2019 a 2021, a saber:

Quadro 3 – Eventos sobre o "AI - Simulação - Logística - Otimização" (2019 a 2021)

Ano	Evento
2021	12th International Conference on Computational Logistics, ICCL 2021
2020	13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing, IDC 2019
2019	Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bangkok, IEOM 2019

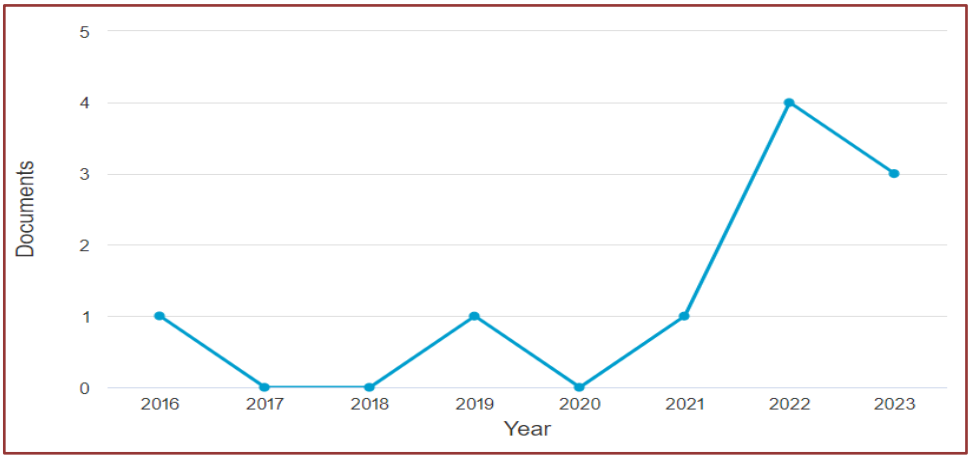
Fonte: SCOPUS. Elaborado pelos autores.

4.1. PUBLICAÇÕES NOS ÚLTIMOS 10 ANOS (2013 - 2023)

A partir da compilação feita nas bases indexadas Scopus e Web of Science, foi possível perceber que o tema pesquisado é ainda embrionário e pouco discutido. A Figura 1 mostra o número de artigos publicados para a busca referente ao período de 2013 a 2023. Os primeiros artigos publicados aparecem no ano de 2016.

As publicações tiverem um aumento a partir de 2021 e 2022 com tendência de crescimento, o que mostra um incremento no interesse de forma convergente nos temas "Inteligência Artificial, Simulação, Logística e Otimização".

Figura 1: Nr. de Publicações por ano de 2013 a 2023

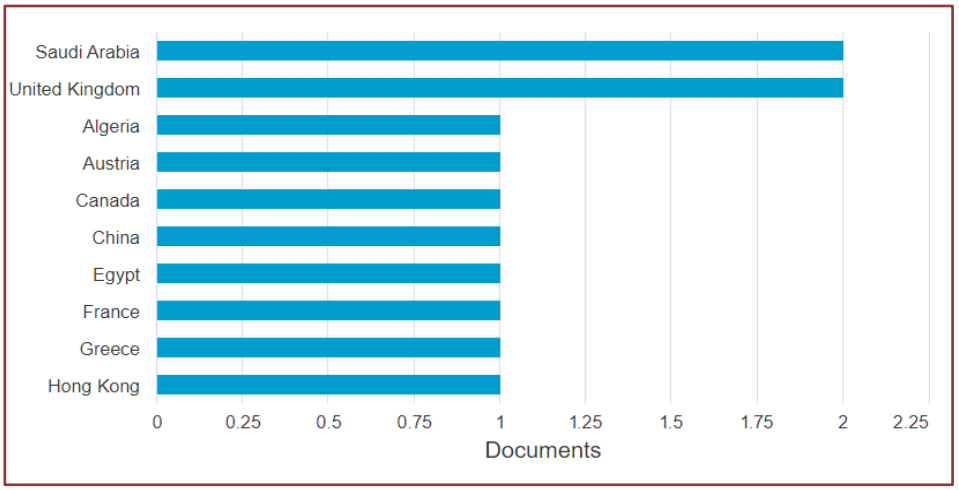


Fonte: Scopus.

4.2. ESTUDOS POR LOCALIZAÇÃO (PAÍSES)

Na distribuição do número de publicações por países, a partir da análise dos dados foi possível verificar que os continentes que em que há maior número de estudos, no período considerado foram Ásia e Europa, com 4 publicações em cada um deles.

Figura 2 – Número de publicações por países de 2013 a 2023



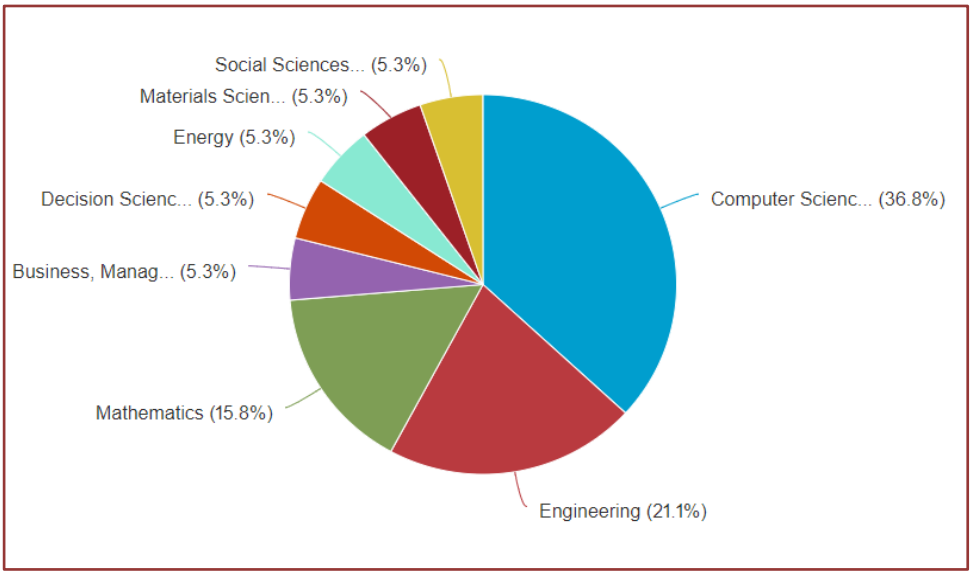
Fonte: Scopus.

Nesse segmento cabe destacar, conforme mostra a figura 2, a produção mais acentuada de publicações na Arábia Saudita e Reino Unido individualmente.

4.3. ÁREAS DE ESTUDO

A temática de "*Simulação, Inteligência Artificial, Logística e Otimização*" tem sido estudada em diversas áreas, conforme pode ser visto na Figura 3. Nesta pesquisa coube destaque para a Ciência da Computação, seguida da Engenharia e da Matemática.

Figura 3 – Distribuição das pesquisas por área de conhecimento de 2013 a 2023



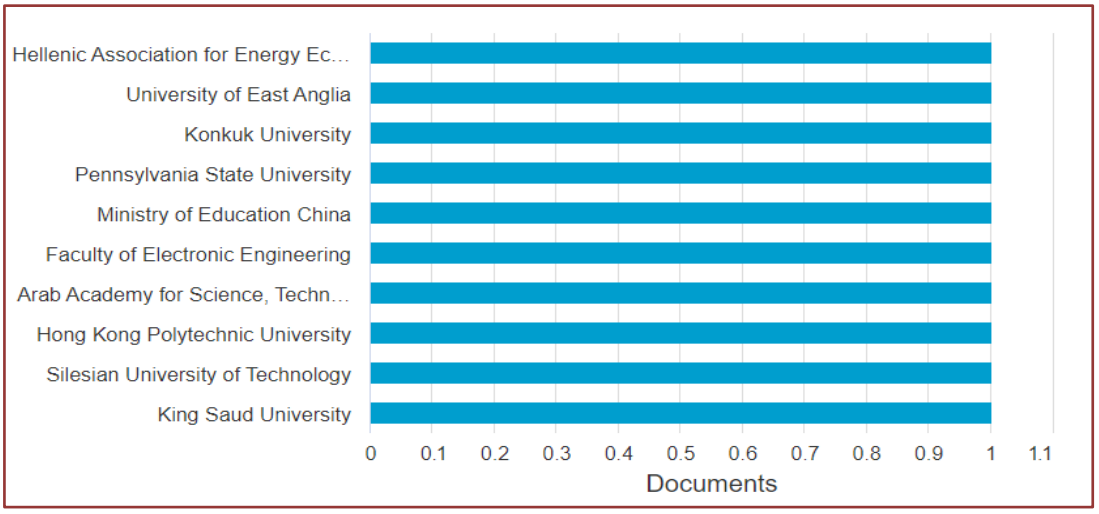
Fonte: Scopus.

4.4. PUBLICAÇÕES POR FILIAÇÕES

Visto a recente procura pela temática, todos os estudos são recentes e podem ser encontrados em áreas de conhecimentos diferentes. Sendo assim, é notável a poucas publicações por associações científicas.

Todos os artigos analisados são de instituições diferentes entre si, o que nos indica que 10 associações educativas distintas iniciaram seus interesses em "AI - Simulação - Logística - Otimização", conforme se pode ver na Figura 4. Portanto, nota-se um crescimento de interesse, entretanto, poucas realizações até o momento por cada uma das filiações, configurando-se ainda num cenário ainda disperso, em geral típico fases iniciais de interesse de pesquisa no tema.

Figura 4 – Publicações por Instituições. Período de 2013 a 2023

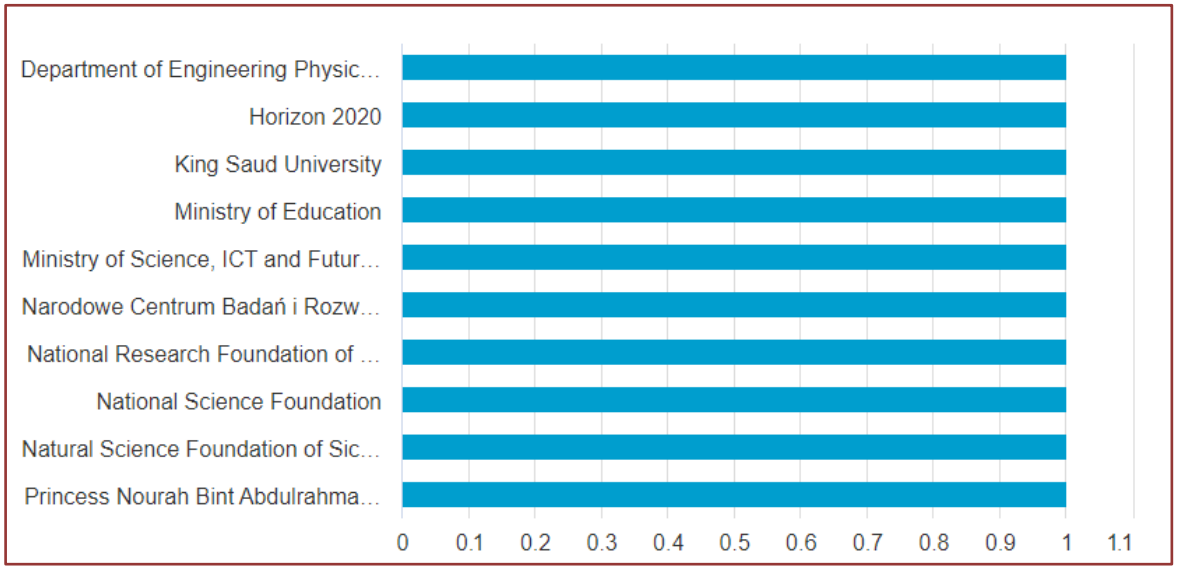


Fonte: Scopus.

4.5. PROJETOS E PESQUISA PATROCINADAS OU FINANCIADAS

Foi possível identificar por meio da busca nas bases 10 estudos patrocinados ou financiados, conforme mostra a Figura 4. Embora num estágio embrionário, o tema despertou interesse e mobilizou entidades para alocar recursos em pesquisa, desenvolvimento ou projeto. Com o avanço da tecnologia e da utilização da Inteligência Artificial, espera-se um aumento de investimentos neste campo de pesquisa nos próximos anos.

Figura 5 – Patrocinadores e Financiadores no período de 2013 a 2023



Fonte: Scopus.

Na dimensão “financiadores” se pode verificar o interesse da Arábia Saudita, com dois financiamentos: a “King Saud University” e “Princess Nourah Bint Abdul Rahman University”. Na Europa os principais financiadores foram: a Horizon 2020, Natural Science Foundation of Sicily e Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Foi possível notar que de forma semelhante às pesquisas por Afiliações e Entidades, o quadro geral é de dispersão no número de projetos por stakeholder ou financiador e também por distribuição geográfica.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo fazer um levantamento do quadro geral, por meio de uma análise bibliométrica, sobre a integração temática entre a simulação, a inteligência artificial e a logística, considerando as publicações referente ao período de 2013 a 2023, na base SCOPUS.

Os resultados mostraram que há um interesse crescente de estudos com a convergência das três áreas de conhecimento, porém com baixa produção em números absolutos. Essa condição não implica em que o tema não seja relevante. Sugere, sim, que é um campo de conhecimento ainda não desenvolvido em termos de projetos e pesquisas, sendo um campo potencial para ser explorado.

REFERÊNCIAS

[1] ADORNO, Sérgio. Inteligência Artificial. Estudos Avançados. V. 35. Nr. 101. Universidade de São Paulo. São Paulo: 2021.

[2] ALSHEHRI, S. et al. (2023). Digital Twin-Based Automated Fault Diagnosis in Industrial IoT Applications.

[3] BALLOU, R. H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

[4] DE OLIVEIRA, M.J.F. A patient-oriented modeling of emergency admission system of a Brasilian hospital. EURO XIII, Glasgow, p. 19-22, jul. 1994.

[5] DU, P. *et al*. AI-based energy-efficient path planning of multiple logistics UAVs in intelligent transportation systems. **Computer Communications**, v. 207, p. 46-55, 2023.

[6] WHITE, K. P.; INGALLS, R. G. The basics of simulation. In: **2018 Winter Simulation Conference (WSC)**. IEEE, 2018. p. 147-161.

[7] KOBAYASHI, S. Renovação da logística: como definir as estratégias de distribuição física global. 1.ed. São Paulo: Atlas, 2000.

[8] KALIAPPAN, V. K. *et al*. Deep Multi Agent Reinforcement Learning Based Decentralized Swarm UAV Control Framework for Persistent Surveillance. In: **Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021. p. 951-962.

[9] LOZNYUK, O. A.; MARTYNOV, A. V.; USACHEV, V. D. MARS: scenarios monitoring and analysis system (Russian). **Oil Industry Journal**, v. 2022, n. 11, p. 42-46, 2022.

[10] MERAIHI, Y.; ACHELI, D.; RAMDANE-CHERIF, A. An improved chaotic binary bat algorithm for QoS multicast routing. **International Journal on Artificial Intelligence Tools**, v. 25, n. 04, p. 1650025, 2016.

[11] NOVAES, Antonio Galvão. Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

[12] NOVAES, Antonio Galvão. Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: estratégia, operação e avaliação. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

[13] SABBADINI, F. S.; GONÇALVES, S.A.; DE OLIVEIRA, M.J.F. Teoria das restrições e simulação aplicada a serviços de saúde. 1ª. ed. – Jundiá, SP: Paco, 2017.

[14] SELLITTO, A. A. Inteligência artificial: uma aplicação em uma indústria de processo contínuo. Gestão e Produção. N.3, p.363-376, dezembro, 2002.

[15] STECLIK, T.; CUPEK, R.; DREWNIAK, M. Automatic grouping of production data in Industry 4.0: The use case of internal logistics systems based on Automated Guided Vehicles. **Journal of Computational Science**, v. 62, p. 101693, 2022.

[16] TSOLAKIS, N. et al. Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 14, p. 4508-4528, 2022.

[17] UDVAROS, J.; GUBÁN, Á.; GUBÁN, M. Methods of artificial intelligence in economical and logistical education. eLearning and Software for Education Conference, p. 414–421. **DOI: http://dx.doi.org/10.12753/2066-026x-19-055**, 2019.

[18] XUE, Y. et al. Camp location selection in humanitarian logistics: A multiobjective simulation optimization approach. In: **International Conference on Computational Science**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 497-504.

[19] YANG, H. et al. Six-sigma quality management of additive manufacturing. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 4, p. 347-376, 2020.

Capítulo 2

Digital image analysis applications using neural networks in colorimetry and textile industry

Yasmim Ribeiro Meirelles
Lisbeth Zelayaran Melgar
Jorge David Alguiar Bellido

Abstract: The application of digital image analysis in colorimetry, across various domains of study, provides means to characterize and detect element concentrations, regarding the method's adaptability. In the textile industry, it facilitates the production of standardized products and an expanded color palette for customers, where textile materials necessitate a high degree of precision in terms of hues and shades in each pigmentation process. The parameterization of an economical and easily operable method is of importance for optimizing quality control. Utilizing digital cameras and programmed software, the analysis of primary RGB colors establishes a correlation between the bit numbers in each image and the concentration and intensity of each analyte, effectively serving as a low-cost spectrophotometer/colorimeter.

Keywords: image analysis, RGB, neural networks, textiles.

1. INTRODUCTION

Colorimetric methods find wide-ranging applications, including medical analysis, such as quantifying resin content in dental studies (Johnston and Kao, 1989), to agriculture, where the quantification of lignin and carbohydrates in animal feed is essential (Knudsen, 1997). The method is also pertinent in the realm of physical studies, for example its use in quantum chromodynamics and heavy quarks (Dokshitzer and Kharzeev, 2001) and are integral to biosensor development (Su et al., 2011). Furthermore, it can be used in the detection of chemical elements using nanoparticles (Chai et al., 2010). For these diverse applications, devices that provide color data can be categorized into three groups: densitometers, colorimeters, and spectrophotometers (Batinié et al., 2019).

Densitometers consist of mirrored metal pieces, either convex or concave, that produce a reflected image (Freitas et al., 2017). These instruments determine the relationship between incident direct light on the sample under investigation and the light transmitted or reflected by the equipment (Batinié et al., 2019). The values obtained are linked to the optical density of the material.

Colorimeters measure the quantity of color using primary and secondary radiation sources, with the latter relating to external light, commonly ambient light (Pathare et al., 2013). These equipment generate color values similarly to the human eye. The incoming image is filtered based on primary colors and converted into an electrical signal (Batinié et al., 2019). Despite the possibility of metamerism errors, colorimeters are the most commonly used instruments for interpreting colorimetric data due to their cost-effectiveness and ease of use in comparison to methods available in the market.

Spectrophotometers detect the spectral distribution of light reflectance or transmittance, which depends on the amount of light and the sample's geometry (Pathare et al., 2013). Measurements are carried out through the interpretation of white light across a range of wavelengths, employing a dispersive element, such as a prism (Batinié et al., 2019). Spectrophotometers differ from colorimeters in their ability to measure colors from various angles, under different types of illumination, and also in the presence of metamerism (Sahin and Sumnu, 2006). Despite being regarded as the gold standard, their high cost and complexity restrict their application in diverse fields.

All the aforementioned devices necessitate the expertise of trained professionals for operation and involve significant maintenance and operational costs, despite their efficiency and capacity to yield excellent results. Consequently, there is a prevalence toward the miniaturization of these instruments, which would result in reduced costs, improved usability, and the potential for field deployment (Crocombe, 2018).

Instruments and methodologies geared toward reducing analysis and maintenance costs, minimizing experimental waste generation, and streamlining the time required for operation and results analysis, have the potential to greatly benefit the scientific community. Therefore, digital image analysis emerges as a promising alternative, relying solely on an image capture sensor and specialized software. This study aims to introduce the methodology and its features and to present its utility in textile material production and colorimetry through a comprehensive review of relevant articles. The articles under consideration employ spectrophotometry as the standard method of comparison.

2. RGB SYSTEM

The visual perception of color can be defined as a sensation, a subjective aspect of appearance in response to a stimulus received by visual cells and transmitted to the brain. This perception is closely linked to the light source, the observed object, and the observer (Melchiades and Boschi, 1999; Tomal et al., 2005). Therefore, what determines the color of an object is its ability to reflect or absorb a certain amount of electromagnetic radiation at a specific wavelength. In other words, the color of a material becomes visible only when it is exposed to incident light (Melchiades and Boschi, 1999; Pathare et al., 2013). A white object reflects all colors within the spectrum, while a black object exhibits no reflectance.

According to the International Commission on Illumination (CIE), chromaticity is represented as a blend of three primary colors, with longer wavelengths associated with the color red, medium wavelengths with green, and shorter wavelengths with blue (Carneiro and Barrigio, 2019). While a single wavelength can represent a color, it is important to note that a color may not necessarily correspond to a single wavelength (Rodman, 2018). The quantity of red, green, and blue required by each material to form a color stimulus is referred to as an imaginary tristimulus value. For a reflectance curve, these values, designated as X, Y, and Z, are associated with the curvature presented and cannot be determined through mathematical calculations but require specialized equipment such as a colorimeter (Pathare et al., 2013). From these values, the actual chromatic coordinates, x, y, and z, can be derived, representing the amounts of red (x), green (y), and blue (z) within the sample. The relationship between X, Y, Z, and x, y, z is as follows:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

The three colors are commonly known in computing as RGB vectors (Red, Green, and Blue) and are related to the mathematical color rendering model (Abd El-Latif et al., 2013). The number of pixels allows the combination of colors at various intensities, with values ranging from 0 to 255 pixels, which is equivalent to 8 units of data information per color or 8 bits (Lima et al., 2014). When light is directed onto the pixels, only the photons of that specific wavelength are perceived. If pixels are unable to store these photon values, only a grayscale coloration can be observed (Özdemir et al., 2017).

Color reading devices can be classified as additive, subtractive, or hybrid. Additive devices create colors by summing or averaging various spectral components of primary colors. Subtractive devices remove unwanted spectral components from white light and thus require this illumination to yield accurate results. Hybrid readers combine both additive and subtractive processes (Sharma and Trussel, 1997).

Image-capturing sensors record colors in relation to the intensity of primary colors within visible wavelengths, along with some small colors in the infrared region of the spectrum (Rodman, 2018). For readings in digital cameras, scanners, and colorimeters, a series of filters representing the primary colors, each with different spectral transmittances, are analyzed by electronic sensors (Sharma and Trussel, 1997). The distinction among these

three previously mentioned devices lies in the lighting; colorimeters and scanners require their own white light source for color analysis, while digital cameras can capture readings under ambient light.

3. DIGITAL IMAGE ANALYSIS

Devices with sensors capable of capturing photos, such as mobile phones, webcams, and scanners, are employed in digital image analysis. In conjunction with pre-programmed software, it can perform concentration detection of various elements through color and lighting of the studied material. Among these instruments, smartphones have been standing out due to the presence of advanced sensors that can read images (digital cameras), sound (microphones), location (GPS), motion (motion sensor), and biometrics (biometric reader) (Ozcan, 2014). Furthermore, these devices act as portable supercomputers, featuring wireless networks, high-resolution cameras, fast communication capabilities, the potential to connect to multiple devices/software, and the dispensability of a qualified operator for resource utilization.

Therefore, smartphones can be used as sources of illumination, detection systems, power sources, or data processing units (García et al., 2011). However, the most interesting characteristic of mobile phones for image analysis is the cost-effectiveness in comparison to other equipment such as spectrophotometers and colorimeters. Mobile phones have been used to provide an easy way to collect, transmit, and organize data through various analysis procedures (Shahvar et al., 2020).

The disadvantage of using the device is that it typically reads up to the visible wavelength, approximately 700 nm. Beyond longer wavelengths, the quality of image capture decreases, and it is necessary to attach other sensors to the device to prevent this decline, which can lead to an increase in the cost of analysis (Crocombe, 2018). Phones also have standard system settings, such as integrated color balance functions that enhance ambient light brightness (Yetisen et al., 2014). However, for data analysis, the use of this support is detrimental to result accuracy, requiring the deactivation of all camera automatic stabilizers.

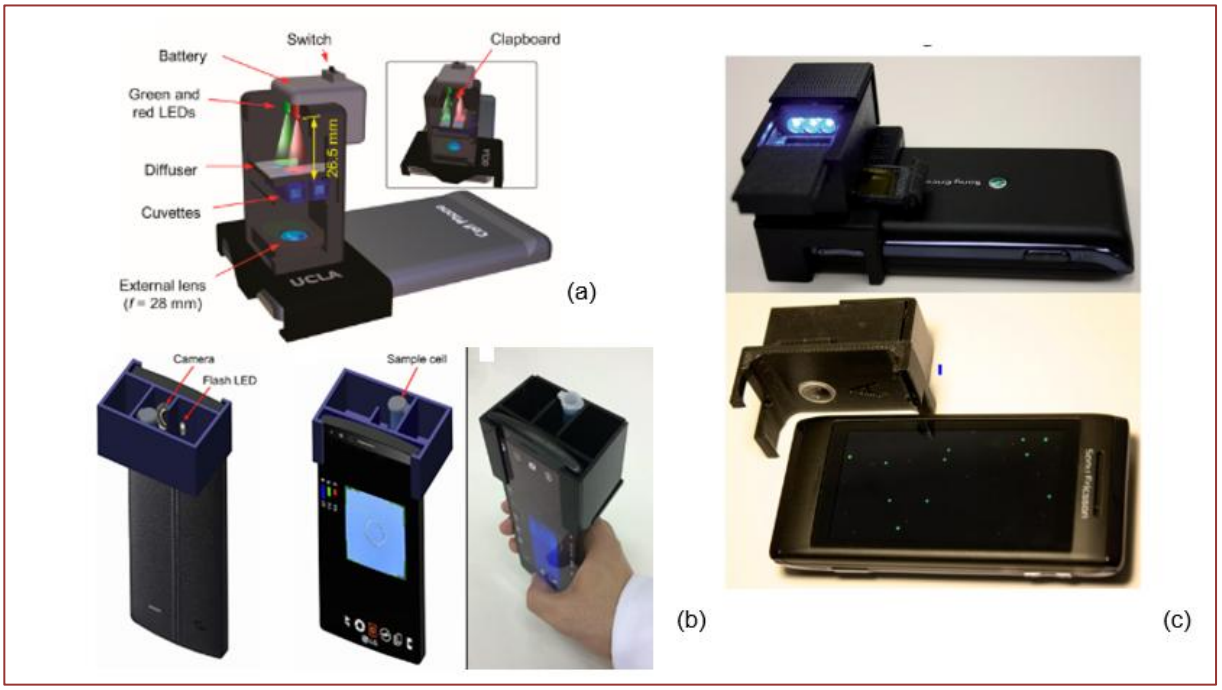
The use of smartphones in analysis is due to their convenience, portability, and the rapid and effective acquisition of results, as previously described. Wei et, al (2014) used this method to detect the concentration of mercury in water. Using LED lamps with wavelengths of 523 and 625 nm, they were able to detect approximately 3.5 ppb of the metal. The authors demonstrated the method's ease by creating a contamination map of mercury through water samples from 50 different locations, including rivers, lakes, seas, and water treated by sanitation companies. For the analysis, an Android application was developed. Chen et. al (2014) employed image analysis to detect 50 nM of Hg2+ in water within approximately 40 minutes, considering that the samples were treated with gold nanoparticles. In their study, the images were captured under natural light, without the use of any equipment designed to create a controlled environment. To minimize errors caused by this choice, the authors adjusted the images using reference color bars and standardized images in white artificial light.

Smartphone image analysis can also be used in the field of healthcare, as demonstrated by Zhu et. al (2011) in their creation of a fluorescent analyzer. In their study on white blood cells from human blood samples, those of interest were continuously deposited in a control volume connected to a microfluidic channel positioned above the cell phone's camera. An LED light connected to the device allowed the excitation of particles, creating fluorescence and thereby detecting the concentrations and densities of cells at a resolution of approximately 2 μm. To demonstrate the method's fluorescent capability, Zhu et. al (2011) used the same equipment from the previous study for fluorescent microspheres and cysts of the protozoan Giardia Lamblia, obtaining results similar to the later work.

Fozouni et. al (2021) developed a method for detecting SARS-CoV-2, detected in nasal RNA tests, using a mobile phone camera. They achieved a sensitivity of 100 copies.μL-1, analyzed in 30 minutes, with positive RNA detection in less than 5 minutes in previously positive clinical analyses. Yetisen et. al (2014) analyzed glucose, protein, and pH levels in artificial human urine using applications developed for iOS and Android, showing good reproducibility and sensitivity. In their study, the application required some operator interventions for the calibration of the device's color, which led to an increased analysis time. Another example of medical analysis is found in the study by Zhu et. al (2013), which quantified the density of red and white blood cells and hemoglobin concentration in human blood. To confirm the quality of the results, the authors used a specific benchtop hematology analyzer and an anonymous blood sample, confirming the method's suitability for samples of approximately 10 μL.

Figure 1 illustrates how mobile phones can be adapted for readings in controlled environments. Smartphones are often used in conjunction with specific software installed on a computer to perform image data analysis. Some examples of applications used include Matlab, Octave, Delphi, Adobe Photoshop, Corel Draw, ImageJ, and others. Despite the photo processing capabilities of a mobile phone, the combined use of developed applications and a computer allows the analyzer greater mobility of data and result prediction.

Figure 1: Illustration of how to adapt a controlled environment for a digital camera. a) 3D schematic illustration for radiometric optical reader (Wei et al., 2014). b) Optical reading equipment for fluorescent analysis with dimensions of 3.5 x 5.5 x 2.4 cm (Zhu et al., 2011). c) Apparatus with internal light presence for the determination of water percentage in ethanol (Shahvar et al., 2020)



4. IMAGE PROCESSING

The calculation of color differences, aimed at obtaining quantitative results in image analysis, can be performed through image processing. In this method, computational algorithms are used to facilitate data investigation and reduce the processing time of RGB data. However, for each area and sample of study, it is inevitable to develop custom applications for research, a necessity recognized by the CIE Technical Committee (Hong and Luo, 2006).

In general, the algorithm developed aims to analyze the data by cropping a small area in the sample image and analyzing all the colorimetric data within it. The cropping is used to select a specific part of the image or change its size, as well as to remove irrelevant details. The image cropping is usually done in rectangular or square geometries, in the format XxY, and it's important to analyze the cropped pixels to avoid destabilization errors in the algorithm (Minz et al., 2020). However, there is a possibility of noise in the image, leading to pixel intensity variation, decreasing color reconstruction accuracy and the ability to separate colors, resulting in inaccurate images and unreliable results (Zhang et al., 2022).

Minz et. al (2020) developed a Scilab software application for colorimetry in food, with results demonstrated using powdered milk. When cropping a piece of the image, a matrix was generated to determine color values. The program had difficulty reading images at 2, 8, and 16 megapixels, i.e., high-resolution images that require more processing time. The experiment was validated using a spectrophotometer, showing good correlation between the methods for low-resolution images.

Hong and Chang (2014) developed a smartphone application that scans colors from a colorimetric matrix of a urine sample, quantifying the species in terms of color change. The program's algorithm considered image rendering, histogram equalization, color limit management, and matching with a reference model, a commercial urine analyzer. With the standardization of calibration curves, the study proved to be efficient and featured a color autocorrection, enabling the method's use in different lighting conditions.

For pH quantification in pH indicator papers using colorimetry, Zhao et. al (2019) studied an algorithm capable of interpolating color linearity obtained from image capture of the material and predicting the solution's pH, where RGB results were transformed into real values through a regression model. The method presented good reproducibility on three different cell phones, with those having better image processing showing low precision due to camera sensor standardizations.

Wei et. al (2009) developed a method to remove shadows from images. The program extracted information according to the lighting and reflectance of the capture. In the application, matrices with constant variations of light transformed images into shades of gray, and a Retinex algorithm, used to improve the visibility of digital photographs, was employed to prevent desaturation and image discoloration. Despite good results for complex and textured captures, the final image's resolution was affected.

To reduce noise in low-light images, Zhang et al. (2022) proposed an algorithm that works to reduce this problem in the color reconstruction stage of capturing semiconductor metal oxide images and optimizing dye combination analysis. The application was based on intensity normalization matrices, based on Gaussian elements. With the Matlab software support, the authors corrected pixel noise and disassociated the image into RGB color and white channels, thus obtaining fluorescent channel images using normalization. The method had processing times twice as fast as traditional systems for these analyses.

It is worth noting that algorithms can also be developed to extract images from videos, as demonstrated by McGuire et. al (2017). The study used Matlab to predict the residence time of particles in a batch homogenizer, using a wet and colored mixture of lactose monohydrate, which, when mixed, induces color changes. In the process, a video of the rotating equipment was recorded and removed from the images by the algorithm, cropping the areas of interest so that the particles could be better visualized. Then, the RGB components were normalized and placed in the model equations, and the results obtained in the color changes were translated into particle volume changes. The algorithm showed better results for binary colors.

As discussed, image processing is an important detail in digital image analysis, and its correct use allows for good results and efficiencies similar to various traditional colorimetry methods. In textile applications, the tests did not show different results, and data manipulation is analogous to the other application areas exemplified in this study.

5. IMAGE ANALYSIS AND ITS APPLICATION IN TEXTILES

When it comes to quality control in textile material coloring, it is common to rely on manual labor, i.e., human vision, to assess color parameters, the pattern of the fabric, and the arrangement of colored threads in the fabric (Zheng, 2015). This method can lead to errors in the final product due to the operator's difficulty in describing color patterns and excessive time consumption. In the industrial environment, colors are often standardized and grouped into models for pattern and color inspection and then, they are modified

according to pre-existing templates. The equipment that performs the readings and transmits the data stores values in black and white scales (Kuo et al., 2008; Kuo and Shih, 2011).

Another drawback is that the variety of templates can hinder the automation of the process due to factors such as the presence of markings or waves in the fabric (Jeffrey Kuo et al., 2005). However, if computational factors are used, uncertainties in image acquisition, data transmission, and sensor screen readings, caused by the equipment's lack of adaptability and color consistency, can lead to serious inaccuracies in the final product (Shao et al., 2005). Digital image analysis aims to simplify and optimize colorimetry applied in this field because it enables color standardization and rapid recognition of fabric patterns.

In an effort to develop a color measurement method, Tang et. al (2019) trained an algorithm in the CIELab software using samples from the Pantone color system. In the study, sub-regions of the image, captured by a digital camera, were divided into areas that would undergo tone calibration to calculate RGB values. In this area, it was possible to convert color spaces into images to extract the necessary values to characterize mixed color regions, as done by Li and Muli (2019). According to the authors, this method allows a better representation of fabric colors and precise quantification of fabrics with varying color differences.

For inspecting colors in printed fabrics, Chung et. al (2004) used a scanner and a neural network model to quantify RGB data. Scanners are ideal due to their controlled environment, uniform lighting, and their ability to analyze one or more samples at the same time, facilitating data analysis. Kuo et. al (2005) presented a similar method, developing a clustering algorithm to form groups of similar colors in a printed fabric to facilitate the identification of color values and the area each color occupies. Using a scanner and Matlab software, the authors demonstrated that it is possible to analyze fabric with unknown characteristics and overcome the difficulties of manual recognition in identifying color patterns. The advantages of using patterns and segmenting areas for printed fabrics are the ability to differentiate various colorations and the easiness of recoloring to obtain an error-free image (Zheng, 2022).

In the work of Li et. al (2022), a study was conducted to optimize the quality of printed colors in textiles. In this method, the color patterns of the sample were read and the areas with coverage issues were checked. The desired area was marked, and blocks were created, which were later compared to other color blocks in the RGB pattern of the study. The comparison allowed the correction of values and the production of high-quality prints. In a similar study from Yao et. al. (2011), fabric colors were detected and analyzed using a monochrome image in different RGB color space coordinates, with each being analyzed and measured.

This method enables the comparison of patterns with samples to determine the best fabric pigmentation, as described by Zehra and Bashir (2019). The authors categorized three groups that the sample could belong to: Group 1 had intrinsic similarity to the pattern; Group 2 had a slight difference in hue, and; finally, Group 3 had no relationship with the pattern. This allowed quality control of monochromatic or colored products.

To reduce the potential effects of lighting and calibration, Wang et. al (2020) trained the algorithm with some color samples so that it could read a virtual image and read the spectral reflectance of the color spaces. The work involved the reconstruction of pixels according to the ambient lighting to standardize equipment calibration (W. Wang et al.,

2020). Therefore, by considering the method's chromaticity error, it was possible to obtain better RGB values and increase the quality control of each piece.

It is possible to analyze the fabric's smoothness and determine if it is more susceptible to wrinkling after washing. To achieve this, Wang et. al (2019) used two-dimensional images captured by a CCD camera (image capture sensor) in a controlled light environment, and their algorithm produced good results for fabric patterns saved in the software's data file. However, the study did not demonstrate good efficiency for minor wrinkles and undefined color patterns.

In addition to calibration errors, defects in the fabric may occur, being imperceptible due to texture or color theme used. As demonstrated by Ren et. al (2021), images captured from defective textiles and transformed into color space blocks allow the determination of defects in pieces with periodic textures through spectral distance values. Xie et. al (2019) shows another way to detect defects using an application that reads samples through a pyramid system. This model was built with the storage of data from non-defective fabrics in a pyramid, so the study samples were filtered by this data, and the defects were presented in block form, similar to the later study. The authors stated that this minimizes deformation errors caused by ambient light or photo capture angles, but it was limited to fabrics dyed with pure colors. It was also possible to demonstrate the presence of defects in unknown fabric samples, with a method accuracy of 96.4% and false negative/positive errors of around 0.4% (Park et al., 2019). However, another study shows that the method's accuracy can reach 96.55%, and sensitivity can reach 96.4%, with a success rate of 94%, capable of detecting up to 6 defects in knit fabrics (Jeyaraj and Nadar, 2019).

It is worth saying that digital image analysis can also be used in the process of selecting raw materials for textile manufacturing. Zhao et. al (2018) analyzed cotton fibers to select foreign objects such as plastic pieces, hair, ropes, and others that may be mixed with cotton during the manufacturing process. In the study, the authors developed five different algorithms and four filters applied to each program, with only two of **them** showing good performance. The article once again demonstrated the facility of applying the method and achieving good results, proving that quality control can be carried out at various stages, from fiber preparation to dyeing.

Table 1 provides a summary of all the methods related to the textile industry mentioned in the article, along with their corresponding references.

Table 1: Summary of the presented methods

Method	Equipment	Application	Results	Observations	Source
Colors detection in fabrics training an algorithm with Pantone scale (1300 different colors)	Digital Camera	Non-specified	Difference between used and standard method average of 1.99, with deviation of 0.44	Analyzes several samples simultaneously; Total of 240 fabric samples analyzed; It is a patent.	Tang et. al (2019)
Detection of several colors in fabrics pigmented with two or more dyes	Non-specified	Non-specified	Avoids the detection of color values using Only one color space; Improves color detection in a mixed color region; Detects different degrees of color; Analyzes several types of fabric.	Algorithm with algebraic expressions; It is a patent.	Li and Muli (2019)
Color inspection on printed fabrics.	Scanner	TWAIN driver *software*	Scanner is ideal to avoid illumination errors; relation between RGB and XYZ values with nonlinear behavior; can analyze multiple samples.	Neural network with algebraic expression to convert RGB to XYZ; printed fabric with different colors.	Chung et. al (2004)
Color and pattern analysis in printed fabrics	Scanner	MATLAB	Effective to analyze color's characteristics and patterns.	Algorithm makes a segmentation of the region to detect the color	Kuo et. al (2005)
Improvement of color fastness qualification rate.	Digital sample	Non-specified	Provides a equipment to increase color fastness qualification rate	Divided in three stages: Printing color patterns on the textile sample to obtain a fabric; color fastness testing performance on the textile to acquire unqualified color blocks, and; replacing the color value of the unqualified color block in the original RGB color block file to obtain a qualified RGB color block file. It is patented.	Li et. al (2022)
Color stability in fabrics and method to classify metamerism images.	Scanner	Non-specified	Efficiency: 96.7% in fabrics with several colors and 90% in one color fabrics	The images are analyzed through black-and-white scale, saturation exposure, shadows and GAMMA value. It is patented.	Yao et. al (2011)
Space color to determine the difference of color fastness in a fabric	Database	MATLAB	Allows to know if the fabric should be take to a recycle line or to final product	-	Zehra and Bashir (2019)
Select the color and give the spectral response	Digital camera	MATLAB	Values of reconstruction and visual quality better than standard methods	Studies handmade fabrics and embroidery; uses the Wiener method for estimation	Wang et. al (2020)
Remove color patterns keeping the wrinkle patterns	CCD camera	MATLAB and Python	Good performance to evaluate the fabric softness	Needs better adaptability for faint wrinkles and untrained color patterns; Translate *image-to-image* using generative conditional adversarial networks	Wang et. al (2019)
Detection of fabric defects based on roughness and color distance measurement	Database	MATLAB	Good performance in fabrics with periodic texture	Uses RGB and HSV spaces	Ren et. al (2021)
Detection of fabric defects with periodic pattern and pure color texture.	Database	Python and CUDA	Precision to locate the defect of 69.58% for periodic pattern knitted and 80.65% of pure color fabrics	Method achieves the proposed method achieves defect localization at the block level	Xie et. al (2019)
	Database	Non-specified	Precision of 96.4% with 0.4% of error	Has better performance with conventional convolutional neural networks	Park et. al (2019)
Detection of fabric defects and its classification	Camera and hardware	AlexNet	Precision to classify of 96.55%, sensitivity of 96.4% and success rate of 94%	-	Jeyaraj and Nadar (2019)
Detection of foreign fibers in cotton for fabric manufacturing	Database	MATLAB	Two of five algorithms presented good precision, 93.17% and 93.61%.	-	Zhao et. al (2018)

6. CONCLUSIONS

This study has brought together several articles that have demonstrated the strong applicability, sensitivity, and precision of digital image analysis supported by pre-configured algorithms for colorimetric determinations. The technique of quantifying RGB values offers an alternative to high-cost operation and maintenance equipment, making it environmentally friendly as it tends to generate less waste compared to conventional methods. Although it presents some challenges, such as wavelength limitations, the need for pre-programmed software, calibration requirements for each element under study, and the difficulty of detecting unknown samples, these hurdles can be easily overcome with the use of a controlled environment and algorithms with extensive databases. The method proves to be efficient for rapid analyses, aiming for cost-effectiveness and ease of operation to optimize quality control in various fields, particularly in the textile industry.

REFERENCES

[1] Abd El-Latif, A. A., Li, L., Wang, N., Han, Q., e Niu, X. (2013). A new approach to chaotic image encryption based on quantum chaotic system, exploiting color spaces. Signal Processing, 93(11), 2986–3000. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.03.031

[2] Batinié, B., Bajié, J., Rajs, V., Lakovié, N., Kulundzié, N., Rodié, D., e Joza, A. (2019). Implementation and signal processing of colorimetric probe. IEEE, 58–53. https://doi.org/10.1109/ZINC.2019.8769468

[3] Carneiro, F. A. de A., e Barrigio, L. M. (2019). Espectro de cores do ponto de vista matemático. Cadernos Do IME - Série Matemática, 13, 1–10. https://doi.org/10.12957/cadmat.2019.37888

[4] Chai, F., Wang, C., Wang, T., Li, L., e Su, Z. (2010). Colorimetric detection of Pb2+ using glutathione functionalized gold nanoparticles. ACS Applied Materials and Interfaces, 2(5), 1466–1470. https://doi.org/10.1021/am100107k

[5] Chen, G.-H., Chen, W.-Y., Yen, Y.-C., Wang, C.-W., Chang, H.-T., e Chen, C.-F. (2014). Detection of Mercury(II) Ions Using Colorimetric Gold Nanoparticles on Paper-Based Analytical Devices. Analytical Chemistry, 86, 6843–6849.

[6] Chung, B.-M., Cho, C.-S., e Park, M.-J. (2004). Color Inspection of Printed Texture using Scanner and NN model. IEEE Internacional Conference on Industrial Technology.

[7] Crocombe, R. A. (2018). Focal Point Review Portable Spectroscopy. Applied Spectroscopy, 72(12), 1701–1751. https://doi.org/10.1177/0003702818809719

[8] Dokshitzer, Y. L., e Kharzeev, D. E. (2001). Heavy-quark colorimetry of QCD matter. In Physics Letters B (Vol. 519). www.elsevier.com/locate/npe

[9] Erik Bach Knudsen, K. (1997). Carbohydrate and lignin. contents of plant materials used in animal feeding. In Animal Feed Science Technology (Vol. 67).

[10] Fozouni, P., Son, S., Díaz de León Derby, M., Knott, G. J., Gray, C. N., D'Ambrosio, M. v., Zhao, C., Switz, N. A., Kumar, G. R., Stephens, S. I., Boehm, D., Tsou, C. L., Shu, J., Bhuiya, A., Armstrong, M., Harris, A. R., Chen, P. Y., Osterloh, J. M., Meyer-Franke, A., … Ott, M. (2021). Amplification-free detection of SARS-CoV-2 with CRISPR-Cas13a and mobile phone microscopy. Cell, 184(2), 323-333.e9. https://doi.org/10.1016/j.cell.2020.12.001

[11] Freitas, M. A. de, Masseli, G. S., Marques, S., e Costa, F. (2017). Protocol for using the forest densiometer in RAPELD plots.

[12] García, A., Erenas, M. M., Marinetto, E. D., Abad, C. A., de Orbe-Paya, I., Palma, A. J., e Capitán-Vallvey, L. F. (2011). Mobile phone platform as portable chemical analyzer. Sensors and Actuators, 156(1), 350–359.

[13] Hong, G., e Luo, M. R. (2006). New algorithm for calculating perceived colour difference of images. The Imaging Science Journal, 54(2), 86–91. https://doi.org/10.1179/174313106X98737

[14] Hong, J. I., e Chang, B.-Y. (2014). Development of the smartphone-based colorimetry for multi-analyte sensing arrays †. Lab On a Chip, 14(10), 1725–1732. https://doi.org/10.1039/c3lc51451j

[15] Jeffrey Kuo, C., Shih, C., Kao, C., e Lee, J. (2005). Color and Pattern Analysis of Printed Fabric by an Unsupervised Clustering Method. Textile Resarch Journal, 75(1), 9–12.

[16] Jeyaraj, P. R., e Nadar, E. R. S. (2019). Computer vision for automatic detection and classification of fabric defect employing deep learning algorithm. International Journal of Clothing Science and Technology, 31(4), 510–521. https://doi.org/10.1108/IJCST-11-2018-0135

[17] Johnston, W. M., e Kao, E. C. (1989). Assessment of Appearance Match by Visual Observation and Clinical Colorimetry. In J Dent Res (Vol. 68, Issue 5).

[18] Kuo, C. F. J., Huang, Y. J., Su, T. L., e Shih, C. Y. (2008). Computerized color distinguishing system for color printed fabric by using the approach of probabilistic neural network. Polymer - Plastics Technology and Engineering, 47(3), 264–272. https://doi.org/10.1080/03602550701866808

[19] Kuo, C. F. J., e Shih, C. Y. (2011). Printed fabric computerized automatic color separating system. Textile Research Journal, 81(7), 706–713. https://doi.org/10.1177/0040517510383619

[20] Li, J., Jin, W., Xu, Z., Martin, F., Xu, J., e Wang, Y. (2022). Method, device and equipment for improving color fastness qualification rate and storage medium . .

[21] Li, Y., e Muli, L. (2019). Method for detecting color diference degree of colored textile fabric.

[22] Lima, M. B., Barreto, I. S., Andrade, S. I. E., Almeida, L. F., e Araújo, M. C. U. (2014). Using webcam, CdTe quantum dots and flow-batch system for automatic spectrofluorimetric determination of NAcetyl-L-cysteine in pharmaceutical formulations. Journal of the Brazilian Chemical Society, 25(9), 1638–1646.

[23] McGuire, A. D., Lee, K. F., Dosta, M., Mosbach, S., Rosenboom, J.-G., Heinrich, S., e Kraft, M. (2017). Compartmental residence time estimation in batch granulators using a colourimetric image analysis algorithm and Discrete Element Modelling. Advanced Powder Technology, 28(9), 2239–2255. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.06.005

[24] Melchiades, F. G., e Boschi, A. O. (1999). Cores e Tonalidade em Revestimentos Cerâmicos. Cerâmica Industrial, 4, 1–6.

[25] Minz, P. S., Sawhney, I. K., e Saini, C. S. (2020). Algorithm for processing high definition images for food colourimetry. Measurement, 158, 107670. https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2020.107670

[26] Ozcan, A. (2014). Mobile phones democratize and cultivate next-generation imaging, diagnostics and measurement tools. Lab Chip, 14(17), 3187–3194.

[27] Özdemir, G. K., Bayram, A., Kiliç, V., Horzum, N., e Solmaz, M. E. (2017). Smartphone-based detection of dyes in water for environmental sustainability. Analytical Methods, 9(4), 579–585. https://doi.org/10.1039/c6ay03073d

[28] Park, K., Oh, S., Lee, S. H., e Cho, N. I. (2019). Blind Detection of Fabric Defects Using Multiple Image Features. In Q. Kemao, K. Hayase, P. Y. Lau, W. N. Lie, Y. L. Lee, S. Srisuk, e L. Yu (Eds.), Proceedings of SPIE. INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED IMAGE TECHNOLOGY (IWAIT). https://doi.org/10.1117/12.2521548

[29] Pathare, P. B., Opara, U. L., e Al-Said, F. A. J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. In Food and Bioprocess Technology (Vol. 6, Issue 1, pp. 36–60). Springer Science and Business Media, LLC. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

[30] Ren, M., Zhu, L., Ma, X., e Cui, L. (2021). Fabric Defect Detection Method Based on Coarseness Measurement and Color Distance. Laser e Optoelectronics Progress, 58(4). https://doi.org/10.3788/LOP202158.0410008

[31] Rodman, D. C. (2018). SPECTROSCOPY AND RGB-COLORIMETRY FOR QUANTIFICATION OF PLANT PIGMENT AND FRUIT CONTENT IN FRUIT DRINKS [Division of Atomin Physics]. Lund University - Faculty of Science .

[32] Sahin, S., e Sumnu, S. G. (2006). Physical Properties of Foods (D. R. HLedman, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Springer Science Business Media, L.L.C.

[33] Shahvar, A., Shamsaei, D., e Saraji, M. (2020). A portable smartphone-based colorimetric sensor for rapid determination of water content in ethanol. Journal of the International Measurement Confederation, 150.

[34] Shao, G. F., Li, Z. S., Zhang, X. C., Huang, T. Y., e Li, G. (2005). Color constancy based skin-color correction. Journal Cent. South Univ (Sci. Technol.), 36(1), 440–444.

[35] Sharma, G., e Trussel, H. J. (1997). Digital Color Imaging. IEEE Transactions on Image Processing, 6, 901–932.

[36] Su, L., Jia, W., Hou, C., e Lei, Y. (2011). Microbial biosensors: A review. In Biosensors and Bioelectronics (Vol. 26, Issue 5, pp. 1788–1799). https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.09.005

[37] Tang, J., Wang, H., Guo, Q., Gao, W., e Zhou, J. (2019). A kind of image-type fabric color measurement method .

[38] Tomal, H. E., Bonifácio, L. da S., e Anaissi, F. J. (2005). Dar cor à cor inexistente: uma reflexão sobre espectros eletrônicos e efeitos cromáticos. Química Nova, 28(5).

[39] Wang, J., Shi, K., Wang, L., Li, Z., Pan, R., e Gao, W. (2019). Decoloration of Multi-Color Fabric Images for Fabric Appearance Smoothness Evaluation by Supervised Image-to-Image Translation. IEEE Access, 7, 181284–181294. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959705

[40] Wang, W., Deng, N., e Xin, B. (2020). Color calibration for fabric image analysis based on spectral reflectance reconstruction. Optik, 208. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164491

[41] Wei, Q., Nagi, R., Sadeghi, K., Feng, S., Yan, E., Ki, S. J., Caire, R., Tseng, D., e Ozcan, A. (2014). Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smart-phone. ACS Nano, 8(2), 1121–1129. https://doi.org/10.1021/nn406571t

[42] Wei, Z., Yao, K., Ji, X., e Yang, M. (2009). Removing Shadow in Color Images using a Combined Algorithm. 2009 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASURING TECHNOLOGY AND MECHATRONICS, VOL I, 506–509. https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2009.656

[43] Xie, H., Zhang, Y., e Wu, Z. (2019). Fabric Defect Detection Method Combing Image Pyramid and Direction Template. IEEE Access, 7, 182320–182334. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959880

[44] Yao, W., Li, T., Wang, D., e Shang, D. (2011). Textile color stability and color aberration grading method.

[45] Yetisen, A. K., Martinez-Hurtado, J. L., Garcia-Melendrez, A., Vasconcellos, F. da C., e Lowe, C. R. (2014). A smartphone algorithm with inter-phone repeatability for the analysis of colorimetric tests. Sensors and Actuators B: Chemical, 196, 1561–160. https://sci-hub.se/10.1016/j.snb.2014.01.077

[46] Zehra, Z., e Bashir, M. N. (2019). Color Fastness Grading System for Textile Industry Using CIEL*a*b Color Space. 2019 4TH MEC INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA AND SMART CITY (ICBDSC), 72–76.

[47] Zhang, Z., Kuang, W., Shi, B., e Huang, Z.-L. (2022). Pushing the colorimetry camera-based fluorescence microscopy to low light imaging by denoising and dye combination. Optics Express, 30(19). https://doi.org/10.1364/OE.466074

[48] Zhao, X., Guo, X., Luo, J., e Tan, X. (2018). Efficient detection method for foreign fibers in cotton. Information Processing in Agriculture, 5(3), 320–328. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.04.002

[49] Zhao, Y., Choi, S. Y., Lou-Franco, J., Nelis, J. L. D., Zhou, H., Cao, C., Campbell, K., Elliott, C., e Rafferty, K. (2019). Smartphone Modulated Colorimetric Reader with Color Subtraction. IEEE Sensors, 1–4. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=earnumber=8956565eisnumber=8956486

[50] Zheng, D. (2015). A new method for automatic separation of fabric color. Textile Research Journal, 85(14), 1520–1538. https://doi.org/10.1177/0040517514561920

[51] Zheng, D. (2022). A new method for textile pattern recognition and recoloring. Color Research and Application, 47(3), 676–690.

[52] Zhu, H., Mavandadi, S., Coskun, A. F., Yaglidere, O., e Ozcan, A. (2011). Optofluidic fluorescent imaging cytometry on a cell phone. Analytical Chemistry, 83(17), 6641–6647. https://doi.org/10.1021/ac201587a

[53] Zhu, H., Sencan, I., Wong, J., Dimitrov, S., Tseng, D., Nagashima, K., e Ozcan, A. (2013). Cost-effective and rapid blood analysis on a cell-phone. Lab on a Chip, 13, 1282–1288. https://sci-hub.se/10.1039/c3lc41408f

[54] Zhu, H., Yaglidere, O., Su, T. W., Tseng, D., e Ozcan, A. (2011). Cost-effective and compact wide-field fluorescent imaging on a cell-phone. Lab on a Chip, 11(2), 315–322. https://doi.org/10.1039/c0lc00358a

Capítulo 3

Predictive analysis in cancer treatment. A case study at Brazilian National Cancer Institute

Antonio Augusto Gonçalves
Francisco Santos Sabbadini

Abstract: Nowadays Brazil has a complex cancer care scenario. There are nearly 600000 new diagnoses of cancer each year in Brazil, and the huge majority of patients have some contact with hospital services. However long waiting lists for diagnostics and treatments have become common, which has led to a situation people being diagnosed with cancer at a very advanced stage. One of the critical success factors in a cancer treatment is an early diagnosis. The reduction of waiting time to start the required therapeutic procedures is one of the principal issues for improvement of patient's quality of life and possibilities of cure. The objective of this work is to describe the development of a decision support system that improves the identification of access alternatives, appointment scheduling and employment of available human resources and diagnostic equipments. The Theory of Constraints is used to identify bottlenecks in patient treatment flow and a Discrete Events Simulation model is used to find alternatives to reduce patients' waiting time to start cancer treatment.

Keywords: Decision Support System, Theory of Constraints, Discrete Event Simulation.

1. INTRODUCTION

The majority of countries have been confronting with serious problems in healthcare, rising from: i) the acceleration in the demand for healthcare due to the growth in the quantity of elderly citizens with chronic diseases; ii) huge demand for accessibility to additional hospital care which guarantees efficiency, equality and customization of care; iii) shortage of financial resources; iv) difficulty recruiting and retaining staffs. (Goeschel et al, 2010).

Medical resources, such as specialized personnel, hospital beds and state-of-the-art equipment are usually costly, which results in a huge economic pressure. These challenges help to transform multifaceted healthcare services, such as cancer treatment, into high relevance areas to study. (Goldblat & Lee, 2010).

Brazil presents a complex scenario in cancer treatment. The occurrences and rates of death have been increasing, around 600.000 cases every year: they are mainly increasing when it comes to prostate cancer in men and breast cancer in women. Research has found that waiting lines for treatment and diagnosis have turn into routine in many regions of the country, resulting in patients being diagnosed at advanced stages of the disease. (INCA,2017).

Cancer-related research and treatment is a long, complex and high-risk process and involves a myriad of activities. (Goldblatt & Lee, 2010) Brazilian cancer patients have experienced long waiting times for many years. Lengthy waiting times for treatment may have a negative clinical impact. Delayed treatment may increase the risk of local recurrence and poor survival.

Despite huge technological advances in treatments, over the recent years, cancer is still responsible for over 130.000 deaths per year in Brazil. Advances in life quality increased citizens life expectations. However, because of limited resources, cancer in Brazil still be considered a severe public health problem. The management of cancer treatment is a long and complex process. The reduction of the patient's waiting time to start cancer treatment plays an increasingly important role in the treatment of this chronic illness. (INCA,2017).

Healthcare simulation models generally requires the implementation of systems with complex activities, involving stakeholders with diversity of views and intentions (Eldabi,2009). It is thought that the active involvement of stakeholders throughout the study can decrease these problems, creating solid ownership of the model formulation and acceptance of charge for actions to be taken. (Rosenhead & Mingers, 2001).

Complex real-world phenomena that are dynamic and consist of random behavior are frequently modeled using stochastic simulations. The mainstream approaches to analysis of such models focus on performance of the system at a given point in time or in a given state or over the long-run simulation output (Banks, 2010).

Organizations rely on data analytics to strategic decisions making. Descriptive analytics is commonly used to provide insight into past behavior. However, greater value can be achieved by predicting future behavior through predictive and prescriptive analytics. Simulation plays a vital role in facilitating predictive-prescriptive analytics. (Perugini, 2014).

The objective of this article is to describe the development of a decision support system for cancer treatment management that contributes to the identification of access alternatives, appointment scheduling and the use of available human and material

resources. The adopted methodology is focused on the patient treatment flow and on the early start of cancer treatment. The Theory of Constraints is used to identify bottlenecks in patient treatment flows and a Discrete Event Simulation model is used to allow short-term booking.

2. LITERATURE REVIEW

Several studies indicate to systemic problems that decrease the quality of the healthcare services and raising complexity of care due insufficient information systems and a lack of patient lifecycle management. Concerns about quality and safety of health care persists. Responsibility for patient care improvement presents unique challenges and great opportunities for managers and medical staffs. (Goeschel et al, 2010).

Considering the increasing requirements for quality services in healthcare, managers must review hospital processes to improve their performance. Healthcare facilities look toward continuous improvement techniques like theory of constraints to improve service delivery. Mapping the current pathway is the initial step in redesign usually beginning with high volume pathways that might offer the greatest benefits. (Greasley, 2006).

Considering the rising requirements for quality services in healthcare, managers must review hospital processes. Healthcare organizations are looking for the adoption of continuous improvement techniques like theory of constraints to upgrade their services delivery. The Theory of Constraints is particularly appropriate in healthcare which frequently consist of the coordination of numerous services. (Burton & Breen, 2002).

The Theory of Constraints is applicable in healthcare which often involves the management of diverse facilities. The development of a model of a complete system implies a necessity for mapping and communicating patient pathways. (Mould et al, 2010).

Process mapping is the first phase in redesign frequently starting with pathways that can offer better results. The redesign process usually involves a multi-disciplinary team under clinical leadership with a bunch of clinical and management staff representing the specialties and services related with the treatment process. (Greasley, 2006).

The search and location of healthcare bottlenecks is not evident, and a deeply analysis would make a significant contribution. Wolstenholme (1999) developed a model to investigate alternatives for reducing pressure on health services at the interface between primary and secondary care. He presented that providing additional intermediate care allowed hospitals to discharge patients more quickly and was more effective at rising throughput than providing extra hospital beds.

Healthcare organizations are usually considered as administrations with distributed decision making structures. Additionally, healthcare stakeholders, such as clinicians and managers, use to apply tacit knowledge of different components of the patient treatment process. These groups tend to have conflicting interests and viewpoints that need to be taken into consideration (Brailsford & Vissers, 2010).

Computer simulation is a well-established method to evaluate systems for purposes of decision support in capacity planning and on-going improvement. The healthcare area is increasing the use of simulation models to decision making processes. (DENTON et al, 2010).

Healthcare services are typically dynamic and stochastic processes. In this scenario discrete event simulation has been frequently applied to model and analyze flows in healthcare processes (Mielczarek & Uzialko-Mydlikowska, 2012).

Discrete-event simulation is a valuable tool for studying system capacity and throughput. The use of simulation models with healthcare application includes emergency departments, hospitals and outpatient clinics. Simulation models can help decision-makers to carry out a 'what if?' analysis to determine good policies for scheduling patients, reducing waiting times bottlenecks, increasing system throughput and improving workflows. (VanBerkel, 2010).

Proctor (2007) used a simulation model to investigate the treatment process, patient flow and bottlenecks at the radiotherapy unit. Discrete-event simulation has been applied in oncology to find the number of linear accelerators to achieve shorter waiting times. Simulation modeling in healthcare is an operational approach to examine the interdependency between human-oriented and infrastructure-oriented variables in complex systems and to investigate scenarios of decision-making from different perspectives.

3. METHODOLOGY

This study was developed through a qualitative research design to present a descriptive analysis of the development of a Decision Support System implemented into the Brazilian National Cancer Institute (INCA).

A single-case study intends to contribute to the knowledge of organizational phenomena, presenting a contemporary description of the system implemented, using an empirical inquiry to answer the questions what, who, where and how (Yin, 2003). The investigation was to be descriptive in nature and it was believed that, through direct observation and semi-structured interviewing, the case study methodology would be the most valuable to describe the implementation process.

The first author is the INCA's Chief Information Office [CIO] and associate professor at the postgraduate program in Business Administration that has been conducting this study. The second author is a full professor at the same program. The third is a full professor at the graduate program in Production Engineering.

4. THE DECISION SUPPORT SYSTEM

Over the last few years, INCA has been investing significantly in the implementation of an IT architecture that integrates the organization´s main processes and provides Decision Support Systems which contains the following four components:

- Clinical Information System, which selects information from the existing database and produces a data structure;
- Electronic Treatment Flow Component, which is able to reconstruct the history of patients in the system;
- Constraint Evaluation Component, which identifies bottlenecks and helps the hospital administrators to evaluate alternative scenarios;
- Patient Scheduling Component (Simulation Model) , which uses the feedback from

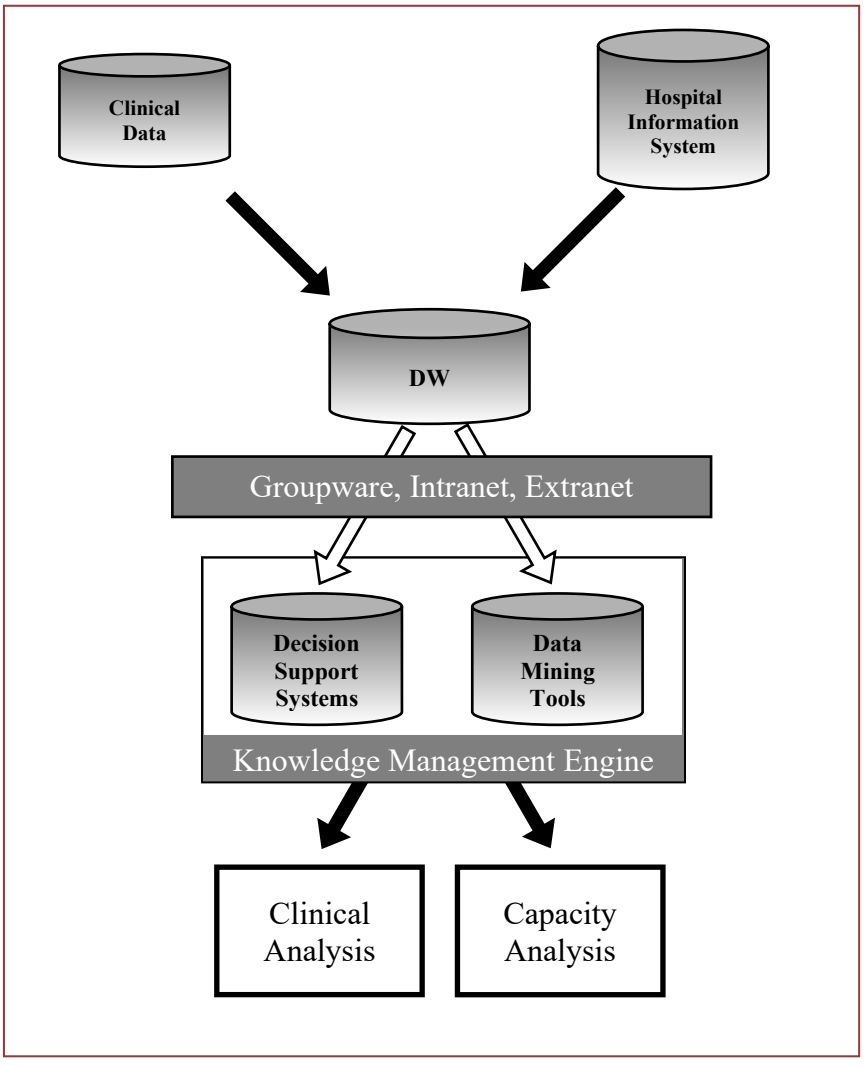
the previous components and leads to the planning the new admissions.

4.1. CLINICAL INFORMATION SYSTEM

Simulation models are often based on data sources of historical data or real time data collected to serve the system. The present vision of INCA is to use systems that can significantly contribute to the practice, education, and research. The existing data structure feeds the clinical data repository, which is the base to build the Clinical information system.

INCA has five specific hospital units with different stakeholders but which share the same processes and technologies based on a common patient database and standardized information systems. To support the physicians' activities, several tools, such as tracking mechanisms for keeping the longitudinal patient history, on-line tools for gathering clinical information and the traditional medical record, are used. Most of these are patient-centric and make the hospital environment amenable to the kind of knowledge management system framework, such as presented in Figure 1.

Figure 1: The INCA Information Architecture

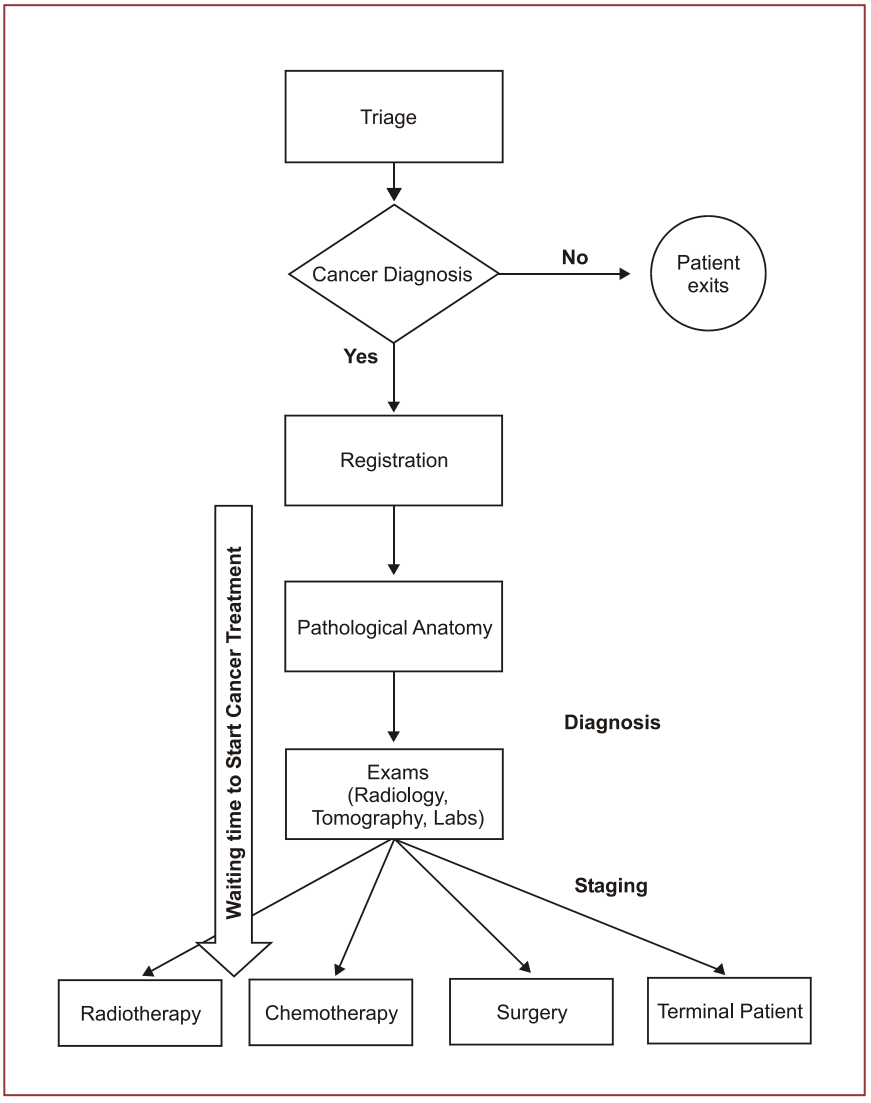


The system was developed using INCA's intranet network that provides a safe access to applications developed to improve healthcare. This solution includes a collaboration environment between physicians and managers, simplifying the physician work, and empowering managers involved in the decision making processes. The legacy systems feed the clinical data repository, which is the basis to build the decision support system.

4.2. ELECTRONIC TREATMENT FLOW

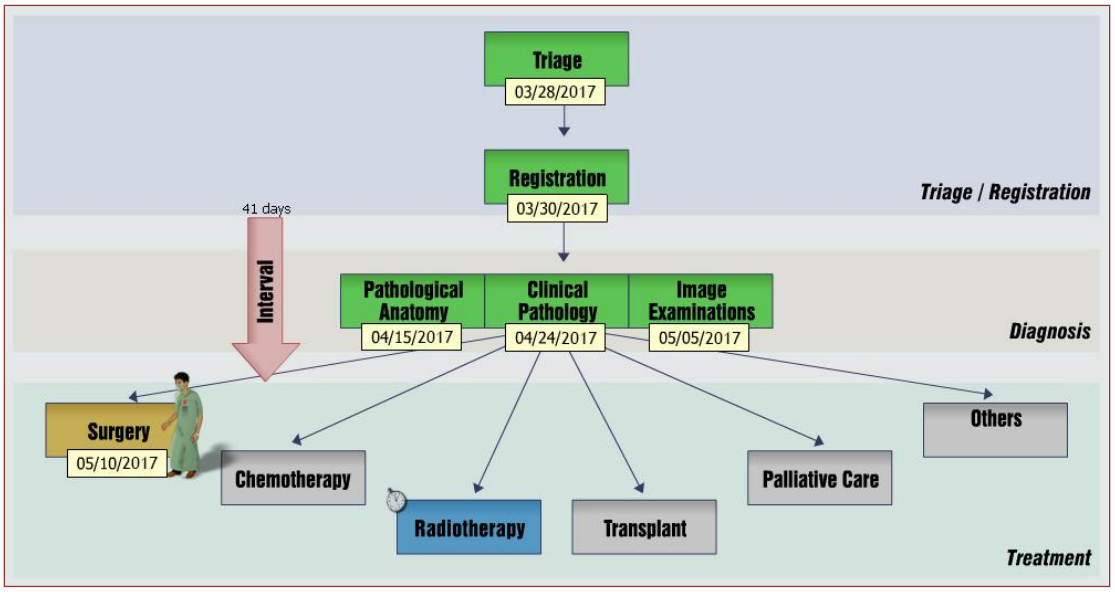
The cancer treatment follows a well-known flow. The localization of the tumor, stage and diagnosis is usually identified after a bunch of preliminary activities. Figure 2 shows a sequence of activities that corresponds, predominantly, to a surgery application of radiotherapy and chemotherapy.

Figure 2: The Cancer Treatment Flow



The electronic flow component is a new interesting feature. It offers the possibility to electronically create the patient's treatment flow from the clinical data repository. Therefore, the users are able to examine, in a visual fashion, the evolution of the treatment. This component is a very useful tool to support decision-making with regards to the care provided. The doctors can blend, in one screen, the past, the present and the future events of the patient treatment history. The sequence of events, the dates and the duration of each event are very important to understand the structure of the treatment. Figure 3 shows an example of the flow of treatment for a particular patient.

Figure 3: The Cancer treatment flow of a particular patient



This component increases the traceability and is totally patient-oriented. It is possible to see, in an animated fashion, the details of the flow of a particular patient over the treatment process. The doctor in charge of the case is able to follow a particular patient or a group of patients step by step in their cancer treatment. Based upon the easily available information, one is able to detect and/or predict possible problem in the treatment flow.

4.3. CONSTRAINT EVALUATION COMPONENT

Understanding the flow of the treatment, evaluating the constraints and manage the bottlenecks could be a possible way to improve quality. A constraint is anything that limits the system's performance. The identification of the constraints is a great opportunity to evaluate and improve the system concerned according to Goldratt (1992).

There are five fundamental steps to follow:

1. Identify the system's constraint(s);
2. Decide how to exploit the system's constraint(s);
3. Subordinate/synchronize everything else to the above decisions;
4. Elevate the system's constraint(s);
5. If in the above steps the constraint has shifted, go back to step 1

These concepts have already been explored for productivity improvements in the manufacturing area. The application of this approach to health services is quite new. A search in the literature provides an excellent and more detailed review of applying the theory of constraints (TOC) to healthcare (Phipps, 1999; Kershaw, 2000; Burton, 2002).

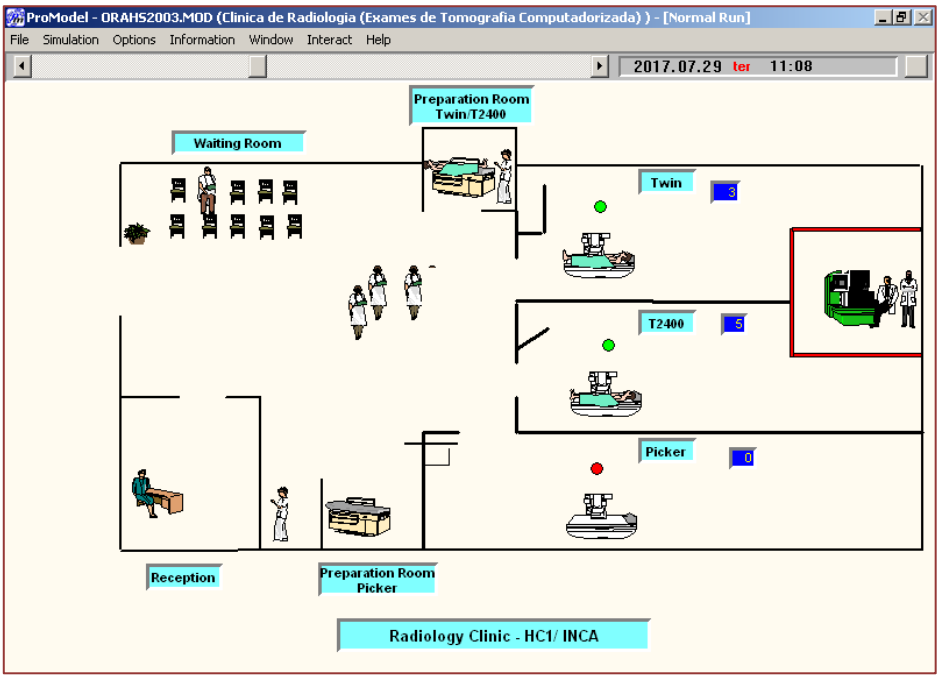
4.4. SIMULATION MODEL

A simulation experiment was made at the image examination sector of one of the hospitals of the INCA. The objective of the model was to contribute to the reduction of the patient's waiting time to start the treatment. The patient's flow was analyzed and the access alternatives focused. The preliminary steps were to identify bottlenecks and evaluate options for the allocation of resources. The model represents the flow of patients at the radiology department of the HC1. The sector had three computed tomography (CT) machines. The annual production was about 15000 exams. The main activities evaluated included:

- Reception;
- Patient preparation;
- Medical examination;
- CT examination;
- Film production.

In this way the simulation model was used to examine alternative scenarios. The objective was to reduction of the waiting time between the image exam schedule, its execution and the dimensioning of the human and material resources. The target was to increase the capacity to complete image exams. Figure 4 shows the model of the flow in the radiology facility.

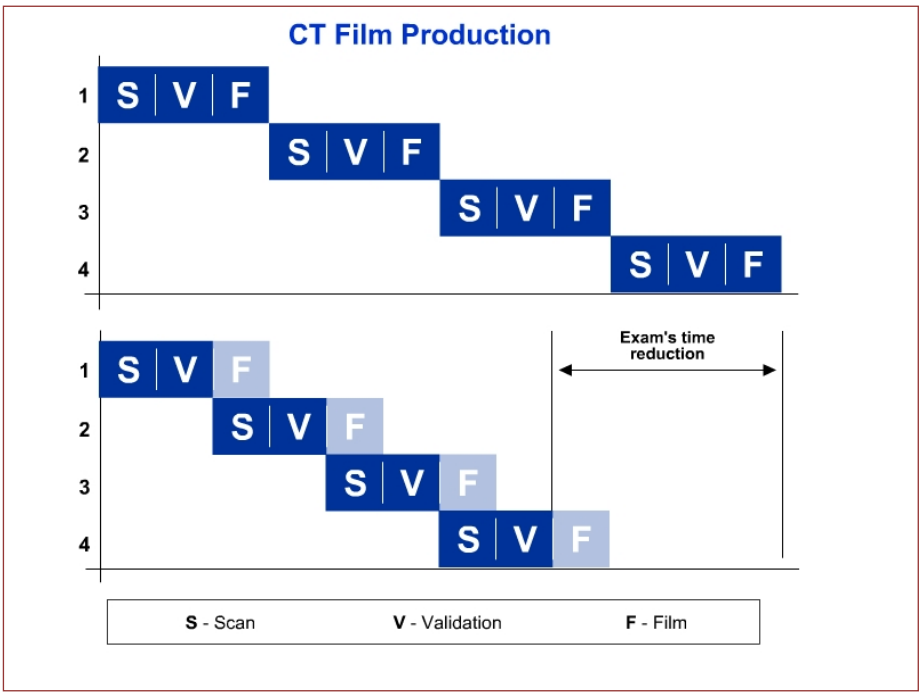
Figure 4: Simulation Experiment



The method of conducting the experiment was the visual simulation that proved to be a powerful tool. The proposed model examines individual patients as they arrive and pass through CT exams. Arrivals, priority rules and exam types provide the necessary detail to reproduce the real-life processes. Alternative scenarios can be compared and modified without high costs. The knowledge gained from the experiments allows one to take decisions without investing major resources.

Simulation was used to investigate several “what- if” scenarios. The experiment showed that to reduce overall exam execution time was necessary to remove the phase of film production. The recommendation was to implement a Picture Archiving and Communication system (PACS). Figure 5 shows how the time of accomplishment of a group of examinations was reduced with the exclusion of the film production phase.

Figure 5: Reduction of CT Exams time



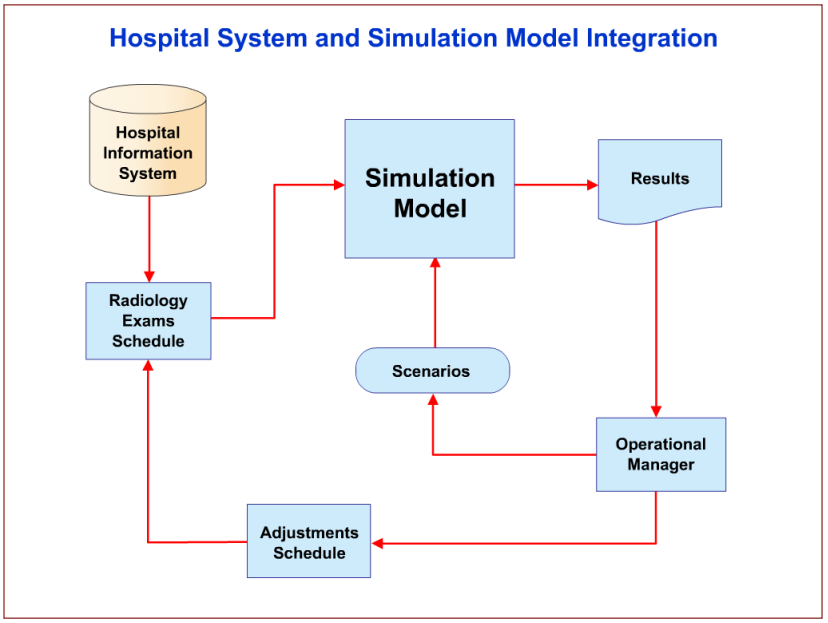
This component is used to support hospital staff to plan and manage the CT´s exams accomplishment. It allows to evaluate both the patient demand and installed capacity of the radiology department and to recommends actions to be taken. The central feature of this tool is to simulate the functioning of the exam accomplishment process on a short time basis. The agendas are balanced through adjustments that are carried through by the operational manager.

Through integrated system architecture:

- The agenda of the exams are produced;
- The preliminary scheduling is simulated;
- The results are evaluate against the actual capacity;
- Adjustments are made in order to balance the agenda;
- The human and material resources are allocated;
- The final agenda is produced.

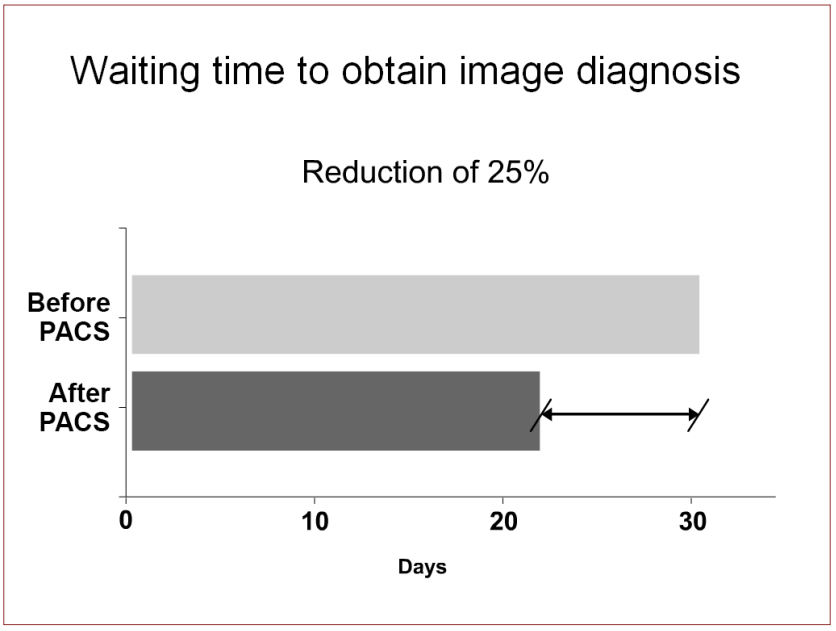
The scheduling components have been used to help the plan of the image exams of the radiology department. The figure 6 shows the scheduling process.

Figure 6: The Scheduling Component



The use of simulation model recommendations has made a significant impact in terms of reduction of the waiting time to obtain image diagnosis at the Hospital of Cancer. A comparative study has evaluated this indicator before and after the implementation of the Picture Archiving and Communication system (PACS). Figure 7 shows that the interval was reduced from 30 to 22 days with a reduction of 25% of the waiting time, proving the effectiveness of the process.

Figure 7: Patients' average waiting time to obtain image diagnosis



5. CONCLUSIONS

The evolution of simulation modelling in healthcare over the past years has been positive. Researchers are conducting exploratory investigation with advanced simulation models as platforms evolve into more efficient environments for implementation.

This paper shows how decision making in a cancer treatment center can be improved using an Integrated Information Support System. The use of this environment provides the necessary analytic support and insight into such operational decisions

The central feature is a suite of programs with four components, which selects information about clinical history of patients, identifies process bottlenecks and uses discrete simulation technique to investigate alternative scenarios to support the schedule of CT's exams.

The evaluation of complex medical informatics applications involves not only the information system, but also its impact on the organizational environment in which it is implemented.

The alternative which is provided by PACS implementation has reduced patients' waiting time for cancer treatment. Its implementation shows, therefore, that good clinical information system can effect positive change.

This research demonstrates the potential of combining theory of constraints with discrete event simulation (DES) to develop a decision support system to overcome the challenge of the reduction of patient´s waiting time to start cancer treatment. Further research can be concentrate in applying these concepts in other types of diseases.

REFERENCES

[1] Brailsford,S.C.,Bolt,T.,Connell,C.,Klein,J.H.,&Patel,B.(2009).Stakeholder engagement in Healthcare simulation simulation. In Proceedings of the 2009 winter simulation conference. Austin, Texas,1840–1849.

[2] Banks J., Carson J.C. , Nelson B. , Nicol D. , Discrete-Event System Simulation, Prentice Hall, 2010 .

[3] Burton T.; Brenn A.; Aron D. Applying the theory of constraints in health care. Quality Management in Health Care, v. 10, n. 3, 2002.

[4] Eldabi,T. (2009) Implementation issues of modeling healthcare problems: Misconceptions and lessons. In Proceedings of the 2009 winter simulation conference. Austin, Texas, USA.1831–1839.

[5] Goeschel CA, Wachter RM, Pronovost PJ. Responsibility for quality improvement and patient safety: hospital board and medical staff leadership challenges. Chest 2010;138:171–8

[6] Goldblatt E.M., & Lee, W-H. (2010). From bench to bedside: the growing use of translational research in cancer medicine. *American Journal of Translational Research*, 2 (1), pp.1-18.

[7] Greasley A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. Technovation 2006;26:95 e 103.

[8] Perugini D.; Michelle Perugini M., Characterized and personalized predictive-prescriptive analytics using agent-based simulation, International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies (IJDATS), Vol. 6 (3), 2014

[9] Proctor S, Lehaney B, Reeves C, Khan Z. Modelling patient flow in a radiotherapy department. Operational Research Insight 2007;20(3):6-14.

[10] Mielczarek, B., & Uzialko-Mydlikowska, J. (2012). Application of computer simulation modeling in the health care sector: A survey. Simulation, 88(2), 197–216.

[11] Mould, G.,Bowers, J.,Ghattas, M., The evolution of the pathway and its role in improving patient

care, Quality Safety in Health Care, pp. 1-6, 2010

[12] B.T. Denton, A.J. Miller, H.J. Balasubramanian, T.R. Huschka, Optimal allocation of surgery blocks to operating rooms under uncertainty, Operations Research 58 (4) (2010) 802–816.

[13] Rosenhead,J.,&Mingers,J. (2001). Rational analysis for a problematic world revisited. Chichester: Wiley.

[14] VanBerkel PT, Blake JT. A comprehensive simulation for wait time reduction and capacity planning applied in general surgery. Health Care Manag Sci 2007;10(4):373-385.

[15] Yin, R.K. (2003). *Case study research: Design and methods*. London: SAGE Publications.

[16] *Young*, *T*., *Brailsford*, *S*., *Connell*, *C*., *Davies*, R., Harper, *P*., & *Klein*, J., Using industrial processes to improve patient care, British Medical Journal, 328, pp. 162–164, 2004

[17] Wolstenholme E. A patient flow perspective of UK health services: exploring the care for new "intermediate care" initiatives. *System* Dynamics *Review 15*253-71, 1999.

Capítulo 4

Plataforma didática integrada baseada em microcontrolador para experimentos em eletrônica digital e analógica

Alan Marques da Rocha
Antonia Alana Claudino Sousa

Resumo: A formação em Engenharia Elétrica e de Computação exige que o estudante articule, de forma integrada, conceitos de eletrônica digital, eletrônica analógica e microprocessadores. Entretanto, na maioria dos cursos de graduação, esses conteúdos são trabalhados em disciplinas compartimentadas, com pouca integração entre teoria, simulação e prática em laboratório. Este artigo apresenta o projeto de uma plataforma didática integrada de baixo custo, baseada em microcontrolador PIC18F e em ferramentas de simulação virtual (Proteus VSM), concebida para unificar experimentos em eletrônica digital e analógica em uma mesma placa. A arquitetura proposta permite a realização de atividades que vão desde o estudo de circuitos analógicos básicos (amplificadores, condicionamento de sinais e conversão analógico-digital) até o controle digital de periféricos (displays, teclados matriciais, LEDs, relés) e a implementação de sistemas embarcados completos. A fundamentação teórica apoia-se em referências consolidadas sobre microcontroladores PIC, ambientes de simulação e metodologias ativas de ensino. Discute-se uma sequência de experimentos integrados e um protocolo de avaliação da aprendizagem, apontando potencial para reduzir custos de laboratório, aumentar o engajamento discente e fortalecer competências em projeto de sistemas embarcados.

Palavras-chave: microcontroladores, eletrônica digital, eletrônica analógica, sistemas embarcados, plataformas didáticas, simulação em proteus.

1. INTRODUÇÃO

Os microcontroladores consolidaram-se como núcleo de uma ampla gama de sistemas embarcados presentes em produtos industriais, automotivos, médicos e de consumo em geral [1, 2]. Em paralelo, a eletrônica digital e analógica permanece como base conceitual indispensável para que o futuro engenheiro seja capaz de projetar e integrar *hardware* e *firmware* de forma eficiente.

Na graduação, entretanto, observa-se frequentemente uma fragmentação do currículo: disciplinas de eletrônica analógica, eletrônica digital e microprocessadores são ministradas em semestres distintos, com plataformas de *hardware* e *softwares* diferentes, o que dificulta ao estudante perceber a continuidade entre a modelagem de sinais analógicos, o tratamento digital da informação e sua implementação em microcontroladores [3].

A literatura recente em educação em sistemas embarcados indica que o uso de plataformas didáticas integradas, associadas a ambientes de simulação, favorece a aprendizagem ativa, a experimentação segura e a redução de custos de infraestrutura [4–6]. Em particular, o uso do *software* Proteus *Virtual System Modelling* (VSM) tem sido reportado como estratégia eficaz para ampliar o acesso a experimentos com microcontroladores, permitindo a co-simulação do circuito eletrônico e do firmware antes da construção do protótipo físico [7–9].

Ao mesmo tempo, livros-texto amplamente utilizados sobre microcontroladores *Peripheral Interface Controller* (PIC) evidenciam a importância de projetos progressivamente mais complexos para consolidar conceitos de arquitetura, periféricos e interação com o mundo analógico [1, 2]. Complementarmente, trabalhos focados em reforma curricular e metodologias baseadas em resultados de aprendizagem (*Outcome-Based Education*) reforçam a necessidade de alinhar práticas laboratoriais com competências específicas em projeto, teste e validação de sistemas [10, 11].

Nesse contexto, este trabalho propõe uma plataforma didática integrada, baseada em microcontrolador PIC18F, voltada para experimentos em eletrônica analógica e digital sob uma mesma infraestrutura de *hardware* e *software*. A proposta dialoga com a linha editorial de coletâneas em engenharia, gestão e inovação, nas quais se destacam contribuições que articulam tecnologia, metodologia e inovação no processo formativo do engenheiro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MICROCONTROLADORES PIC E SISTEMAS EMBARCADOS EDUCACIONAIS

Os microcontroladores da família PIC continuam amplamente empregados em contextos educacionais devido à combinação de baixo custo, ampla documentação e disponibilidade de ferramentas de desenvolvimento [1, 2, 12]. Obras como as de Bates [1] e Verle [2] sistematizam desde conceitos básicos de arquitetura, temporizadores, interrupções e conversão analógico-digital (A/D) até projetos avançados envolvendo LCDs, teclados, motores e protocolos seriais, reforçando sua adequação como plataforma de ensino.

Ambientes de desenvolvimento como *Microchip Programming Laboratory* (MPLAB) X IDE, combinados com compiladores C (XC8), permitem que estudantes concentrem esforços na lógica de aplicação, explorando boas práticas de programação estruturada e modular em sistemas embarcados [1].

2.2. ELETRÔNICA ANALÓGICA, DIGITAL E INTERFACEAMENTO COM MICROCONTROLADORES

A eletrônica analógica fornece os blocos fundamentais para condicionamento de sinais, como amplificação, filtragem, adaptação de impedância e limitação de corrente/tensão. Na interface com microcontroladores, são recorrentes circuitos de:

- divisores de tensão e buffers para adequação de níveis;
- amplificadores operacionais em configuração de ganho, seguidor de tensão ou filtro ativo;
- estágios de potência com transistores ou *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (MOSFETs) para acionar cargas como relés, motores e LEDs de alta potência.

A eletrônica digital, por sua vez, trata da representação binária da informação, da lógica combinacional e sequencial e de dispositivos como *flip-flops*, contadores, registradores e memórias. Quando integrada a microcontroladores, permite desde a leitura de chaves e sensores digitais até o controle de displays de sete segmentos, interfaces paralelas e barramentos seriais.

Uma plataforma didática que reúna módulos analógicos e digitais, conectados a um mesmo microcontrolador, favorece a compreensão de que o sistema embarcado é um elo entre o mundo contínuo e o discreto, facilitando o entendimento de funções de conversores A/D e D/A, bem como de protocolos de comunicação [2, 12].

2.3. SIMULAÇÃO DE MICROCONTROLADORES COM PROTEUS VSM

O Proteus VSM consolidou-se como uma das ferramentas mais utilizadas para simulação de projetos com microcontroladores em ambiente acadêmico [7, 8]. Sua principal característica é a co-simulação do circuito elétrico e do *firmware*, permitindo que componentes digitais, analógicos e o núcleo do microcontrolador sejam simulados de forma integrada, com visualização em tempo real de sinais, estados lógicos e variáveis internas.

Su e Wang [7] demonstram que o uso de Proteus VSM em disciplinas de microcontroladores reduz o tempo de montagem de experimentos, aumenta a segurança e permite que mais cenários sejam explorados em um mesmo tempo de aula. Fan [4] e outros autores reportam que a combinação de ambientes como Keil/Proteus ou MPLAB/Proteus propicia ciclos rápidos de edição, compilação e depuração, aproximando os estudantes de práticas profissionais. Estudos sobre laboratórios virtuais indicam ganhos em flexibilidade, escalabilidade e acessibilidade, especialmente quando há restrições de espaço físico ou de número de *kits* de *hardware* [5, 6, 9].

2.4. METODOLOGIAS ATIVAS E INTEGRAÇÃO CURRICULAR EM SISTEMAS EMBARCADOS

Abordagens de ensino centradas em projetos, problemas e competências têm sido progressivamente adotadas no ensino de microcontroladores e eletrônica [10, 11, 13]. Modelos baseados em *Conceive, Design, Implement, Operate* (CDIO) e em *Outcome-Based Education* (OBE) reforçam a importância de planejar experiências de aprendizagem que

cubram o ciclo completo de concepção, simulação, implementação e teste de sistemas, com critérios explícitos de avaliação de desempenho [10, 11].

No contexto de cursos de engenharia, a integração entre conteúdos de eletrônica analógica, digital e microprocessadores por meio de projetos unificados e plataformas de baixo custo vem sendo apontada como estratégia para aumentar a motivação dos estudantes, aproximar o currículo das demandas da indústria e desenvolver habilidades transversais, como trabalho em equipe, documentação técnica e pensamento crítico [4, 6, 13, 14].

3. METODOLOGIA

3.1. OBJETIVO DA PLATAFORMA DIDÁTICA

A plataforma proposta tem como objetivo oferecer um ambiente integrado para experimentos em:

- eletrônica analógica (condicionamento de sinais, medição, conversão A/D);
- eletrônica digital (lógica combinacional, sequencial e dispositivos digitais programáveis);
- programação de microcontroladores (*firmware* em C, temporização, interrupções, comunicação serial).

O foco é permitir que uma mesma placa de desenvolvimento, associada a modelos equivalentes no Proteus VSM, suporte uma sequência progressiva de experimentos desde o nível introdutório até aplicações de maior complexidade em sistemas embarcados.

3.2. ARQUITETURA DE *HARDWARE* PROPOSTA

A placa didática é organizada em blocos funcionais:

1. Núcleo de processamento:

- Microcontrolador PIC18F4520 ou similar, operando com clock de 8–20 MHz, configurável por cristal ou oscilador interno.
- Conectores para programação *In-Circuit Serial Programming* (ICSP) e para interface com o simulador via arquivo .hex.

2. Módulo de entrada analógica:

- Entradas analógicas conectadas aos canais A/D do microcontrolador, com estágios de condicionamento baseados em amplificadores operacionais (configurações não inversoras e seguidor de tensão).
- *Trimpots* e sensores (temperatura, luminosidade, potenciômetro) para geração de sinais analógicos controláveis.

3. Módulo de saída analógica/digital:

- Circuitos de acionamento *Pulse Width Modulation* (PWM) para controle de intensidade luminosa de LEDs de alta potência e velocidade de motores DC.
- Filtros RC configuráveis para experimentos de conversão D/A por modulação PWM.

4. Módulo de interface digital:

- Matriz de chaves (teclado 4×4), *push-buttons* de uso geral e DIP-*switches*.
- Displays de sete segmentos e display LCD alfanumérico 16×2.
- Barras de LEDs para visualização de estados lógicos.

5. Módulo de potência e proteção:

- Reguladores lineares ou chaveados para alimentação de 5 V e 3,3 V.
- Fusíveis de proteção, diodos de roda livre em cargas indutivas e jumpers de configuração.

O *layout* da placa é concebido de modo a permitir correspondência direta com o diagrama esquemático utilizado no Proteus VSM, facilitando a transição entre simulação e montagem física.

3.3. MODELO DE SIMULAÇÃO EM PROTEUS VSM

Para cada bloco de *hardware*, é desenvolvido um subconjunto de modelos em Proteus VSM, incluindo:

- o microcontrolador PIC18F correspondente, configurado com o mesmo *clock* e *bits* de configuração adotados na placa física;
- componentes passivos e ativos com valores idênticos aos da placa;
- instrumentos virtuais (osciloscópio, multímetro, analisador lógico) para observação de sinais.

O fluxo de trabalho didático proposto segue os passos:

1. desenvolvimento e compilação do *firmware* em C no MPLAB X;
2. geração do arquivo .hex e sua associação ao microcontrolador no Proteus;
3. simulação do circuito, observando-se sinais analógicos e digitais;
4. correção de eventual comportamento inadequado e, somente após validação, transferência do *firmware* para a placa física.

Essa abordagem alinha-se a recomendações de uso de laboratórios virtuais como etapa intermediária entre teoria e prática, reduzindo tempo de depuração no laboratório e custos com componentes danificados [5, 7, 9].

3.4. SEQUÊNCIA DE EXPERIMENTOS INTEGRADOS

Propõe-se uma trilha de experimentos organizada em níveis:

- Nível 1 – Fundamentos de entrada/saída digital:
  - Pisca-LED simples;
  - leitura de botões e acionamento de barras de LEDs;
  - implementação de máquina de estados finitos para controle de um semáforo veicular.

- Nível 2 – Integração com eletrônica analógica:
  - leitura de tensão analógica em divisor resistivo;
  - condicionamento de sinal de sensor de temperatura via amplificador operacional e conversão A/D;
  - geração de sinal analógico equivalente por PWM e filtro RC.
- Nível 3 – Interfaces avançadas:
  - escrita em display LCD 16×2 para exibição de valores medidos;
  - implementação de menu simples acessado por teclado matricial para seleção de modos de operação;
  - comunicação serial com computador para registro de dados de experimento.
- Nível 4 – Projeto integrador:
  - desenvolvimento de um sistema de monitoramento de grandeza física (temperatura, luminosidade ou tensão) com registro em LCD, alarme por LEDs e *buzzer*, e armazenamento simplificado em memória não volátil;
  - documentação completa do projeto (esquemático, *firmware* e resultados de testes).

Essa trilha permite ao estudante transitar de conceitos básicos de lógica digital e eletrônica analógica para um projeto sistêmico, consolidando competências em concepção, projeto, implementação e operação de sistemas embarcados [10, 11, 13].

3.5. PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DA APRENDIZAGEM

A avaliação proposta combina componentes formativos e somativos:

- questionários diagnósticos no início do semestre para mapear conhecimentos prévios em eletrônica e programação;
- rubricas de avaliação por projeto, contemplando corretude funcional, organização do código, documentação e segurança elétrica;
- autoavaliação e avaliação por pares em projetos de grupo;
- questionários de percepção sobre uso da simulação e da plataforma física, adaptados de instrumentos utilizados em estudos de laboratórios virtuais e de ensino de microcontroladores [4–6, 14].

Os dados coletados podem subsidiar ciclos de melhoria contínua da disciplina e da plataforma, em consonância com abordagens de OBE e CDIO.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação piloto da plataforma foi estruturada em uma disciplina de Microcontroladores em curso de Engenharia Elétrica, ao longo de um semestre letivo. Embora este artigo se concentre na descrição da arquitetura e do método, alguns resultados qualitativos observados merecem destaque, à luz da literatura.

Primeiramente, a possibilidade de simular integralmente o circuito antes da montagem física reduziu o tempo gasto em atividades de depuração em bancada, o que está alinhado com achados de Su e Wang [7] e de Balamuralithara e Woods [5], que apontam ganhos significativos de eficiência com o uso de laboratórios virtuais. Estudantes relataram maior confiança ao transferir o *firmware* para a placa após observarem o comportamento esperado no Proteus, reforçando a percepção de continuidade entre o ambiente de simulação e o *hardware* real.

Em segundo lugar, a organização modular da placa facilitou a integração entre conteúdos de eletrônica analógica e digital. Experimentos que combinavam leitura de sensores analógicos, condicionamento de sinal e decisão lógica baseada em limiares configuráveis permitiram discutir, em uma mesma aula, tópicos tradicionalmente abordados em disciplinas distintas, como amplificação, conversão A/D e estruturas de controle em linguagem C. Tal integração é coerente com recomendações de reformulação curricular que defendem a ruptura de silos entre disciplinas e a centralidade de projetos integradores [10, 11, 13].

Outro aspecto relevante foi a adoção de projetos de maior porte no nível 4 da trilha proposta. Estudantes foram incentivados a conceber aplicações contextualizadas, como sistemas semafóricos inteligentes, registradores de dados ambientais ou controladores de velocidade de motor DC. A literatura em sistemas embarcados e em metodologias ativas indica que tais projetos contribuem para o desenvolvimento de competências de projeto de sistema, resolução de problemas abertos e trabalho colaborativo [4, 6, 13, 15]. A experiência observada na disciplina corrobora essa tendência, com relatos de maior engajamento e de percepção de relevância prática.

Do ponto de vista da gestão de laboratório, a combinação de simulação e *hardware* de baixo custo mostrou-se vantajosa. A plataforma pode ser replicada com orçamento relativamente reduzido, em comparação com *kits* comerciais importados, ao mesmo tempo em que a simulação em Proteus amplia a capacidade de atendimento a turmas maiores, inclusive em situações de ensino híbrido ou remoto, cenário discutido em trabalhos sobre práticas *online* em disciplinas de microcontroladores [14].

Entretanto, alguns desafios foram identificados. A curva de aprendizagem inicial dos estudantes em relação ao uso combinado de MPLAB X e Proteus VSM exige planejamento cuidadoso das primeiras aulas, com tutoriais guiados e materiais de apoio. Além disso, a manutenção das placas físicas demanda procedimentos padronizados de verificação e reparo, de modo a garantir a confiabilidade dos resultados experimentais. Tais desafios são consistentes com apontamentos de estudos que discutem a adoção de novas metodologias e ferramentas em cursos já consolidados [4, 10, 11].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou o projeto de uma plataforma didática integrada, baseada em microcontrolador PIC18F e em simulação com Proteus VSM, concebida para articular experimentos em eletrônica analógica, eletrônica digital e sistemas embarcados em uma única infraestrutura de *hardware* e *software*.

A fundamentação teórica evidenciou que:

- microcontroladores PIC continuam sendo opção robusta e bem documentada para uso educacional [1, 2, 12];

- ambientes de simulação como Proteus VSM enriquecem a experiência de laboratório, reduzindo custos e ampliando a segurança e a flexibilidade [5, 7–9, 16];
- abordagens curriculares baseadas em competências, CDIO e OBE reforçam a importância de projetos integradores e de plataformas que conectem teoria, simulação e prática [10, 11, 13].

A metodologia proposta detalhou a arquitetura de *hardware*, o modelo de simulação e uma sequência de experimentos que permite ao estudante evoluir de atividades introdutórias para projetos integradores. Os resultados qualitativos sugerem ganhos em engajamento, integração de conteúdos e eficiência do uso de laboratório, apontando a plataforma como alternativa viável para cursos de graduação em engenharia nas áreas de microprocessadores, eletrônica digital e analógica.

Como trabalhos futuros, destacam-se:

- a realização de estudos quantitativos com instrumentos validados para medir aprendizagem conceitual e desenvolvimento de competências;
- a comparação sistemática entre turmas que utilizam a plataforma proposta e turmas que utilizam apenas kits comerciais genéricos;
- a extensão da plataforma para outros núcleos de processamento (por exemplo, ARM Cortex-M e placas Arduino compatíveis) mantendo-se a filosofia de integração entre analógico, digital e simulação.

Espera-se que a proposta contribua para o debate sobre inovação em ensino de sistemas embarcados, oferecendo um modelo replicável por instituições que disponham de recursos limitados e que busquem alinhar suas práticas laboratoriais às demandas contemporâneas da indústria e da sociedade.

REFERÊNCIAS

[1] [BATES, M. P. Programming 8-bit PIC Microcontrollers in C: with Interactive Hardware Simulation. Oxford: Newnes, 2008.

[2] VERLE, M. PIC Microcontrollers – Programming in C. Belgrade: mikroElektronika, 2009.

[3] EL-ABD, M. A Review of Embedded Systems Education in the Arduino Environment. International Journal of Engineering Pedagogy, v. 3, n. 1, p. 19–25, 2013.

[4] FAN, H. et al. Teaching Reform of Microcontroller Unit Based on Experiment. In: International Conference on Education Technology and Computer Science, 2019.

[5] BALAMURALITHARA, B.; WOODS, P. C. Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. Computer Applications in Engineering Education, v. 17, n. 1, p. 108–118, 2009.

[6] ARM EDUCATION. Rapid Embedded Systems Design Education Kit. Arm University Program, 2023. Disponível em: https://www.arm.com/resources/education/education-kits/rapid-embedded-systems.

[7] SU, B.; WANG, L. Application of Proteus Virtual System Modelling (VSM) in Teaching of Microcontroller. In: E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies (EDT), 2010 International Conference on. IEEE, 2010. p. 375–378.

[8] LABCENTER ELECTRONICS. Proteus VSM Simulation – A global standard in education. Labcenter Electronics, 2024. Disponível em: https://www.labcenter.com/education/.

[9] METRI, V. et al. Microcontroller Simulation Using Virtual Simulation Machine. Journal of Electrical

Engineering and Technology, v. 10, n. 2, p. 1–8, 2024.

[10] LIU, J. Research on the Teaching Reform of MCU Based on CDIO. In: International Conference on Education, Management and Applied Social Science (EMASS), 2019.

[11] YANG, P. et al. Teaching Reform and Practice Using the Concept of Outcome-Based Education: A Case Study on Curriculum Design for a Microcontroller Unit Course. 2022.

[12] MIKROELEKTRONIKA. PIC Microcontrollers – Programming in C. 2. ed. Belgrade: mikroElektronika, 2009.

[13] LOW-COST Undergraduate Control Systems Experiments Using Microcontroller-Based Control of a DC Motor. In: IEEE Frontiers in Education Conference, 2011.

[14] ZHAO, J. et al. Online Teaching Practice of Applied Undergraduate Microcontroller Principle Experiment. International Journal of Social Science and Education Research, v. 8, n. 10, p. 365–372, 2025.

[15] OLIVEIRA, V. I. et al. Teaching using the Arduino platform applied to microcontrollers discipline. South American Development Society Journal, v. 7, n. 20, p. 252–270, 2021.

[16] LABCENTER ELECTRONICS. Circuit Simulation Software with SPICE and MCU Co-simulation. Labcenter Electronics, 2024. Disponível em: https://www.labcenter.com/simulation/.

Capítulo 5

Desenvolvimento de uma plataforma para comunicação entre dispositivos industriais nos padrões Modbus e Ethernet

Matheus Horta de Paula
Mário Cupertino da Silva Júnior
Marcos Vinícius Lopes Pereira
Michel Carlo Rodrigues Leles
Adson Andrade Barros
Nara Silveira Velloso
Luis Gustavo Figueiredo França

Resumo: Os protocolos Modbus e Ethernet estão ganhando cada vez mais espaço no meio industrial. Isto se deve a vários fatores como custo, confiabilidade de operação, flexibilidade, praticidade em seu uso, entre outras vantagens. Baseado neste cenário, o presente trabalho tem como objetivo principal testar o desempenho e a atuação destes protocolos de redes industriais, funcionando em conjunto através de alteração de estados de sensores e análise dos pacotes transmitidos por toda a rede. Os resultados mostraram que estas duas redes provaram ser versáteis, além de suportar a bateria de testes, apresentando poucos erros e algumas dificuldades de implementação.

Palavras-chave: Automação, Protocolos de Comunicação, Redes e Sensores Industriais.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Moraes e Castrucci (2007), devido ao grande avanço tecnológico observado atualmente, as redes de automação estão sendo largamente utilizadas nos diferentes setores industriais, impondo vantagens em relação aos sistemas convencionais de cabeamento. Dentre estas vantagens se destacam: a diminuição de fiação, facilidade na manutenção, flexibilidade na configuração da rede e diagnóstico dos dispositivos. Além disso, os autores citam que como estas redes fazem uso de protocolos de comunicação digitais padronizadas, a integração de equipamentos de vários fabricantes distintos se torna possível e viável, tornando o sistema mais flexível e com maior capacidade de expansão.

Geralmente uma rede é constituída de três elementos, dentre eles o meio físico e o endereçamento. O outro elemento é o protocolo, que define a linguagem e as regras de comunicação dentro da rede. Kobayashi (2009) cita que as redes industriais ou redes de automação possuem protocolos de comunicação específicos, com os quais os dispositivos trocam informações. Sendo que, essas redes industriais de automação, geralmente são compostas por diversos dispositivos, sendo comum encontrar Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) junto com dispositivos sensores e/ou atuadores.

Dentre os diferentes tipos de protocolos de comunicação, entre dispositivos industriais existentes atualmente, o Modbus e o Ethernet vem sendo largamente adotados e utilizados nos mais variados setores, que fazem uso de tecnologias da automação industrial, como nas indústrias alimentícias, siderúrgicas, nas áreas relacionadas com a produção em linhas de montagem, como a indústria automobilística dentre outras.

O protocolo Modbus foi criado em 1979 pelo fabricante Modicon, que hoje pertence a Schneider Electric, sendo este protocolo um dos mais antigos e, ainda hoje, um dos mais utilizados nos diversos equipamentos industriais fabricados, como na rede de vários tipos de Controladores Lógicos Programáveis (CLP), com o intuito de adquirir sinais, valores de instrumentos e comandar atuadores (Scheneider Eletric, 2007). Após sua integração com o meio físico Ethernet, a popularidade deste protocolo aumentou exponencialmente, tornando-se um bom padrão a ser adotado. Tal fato é consequência também de se tratar de um protocolo aberto (não é necessário o pagamento de licença), além de ser simples e fácil de ser implementado (Guarese, 2011).

Através da evolução na forma de comunicação, passou-se a ser necessário apenas um computador com conexão à internet para que o protocolo Modbus possa ser implementado, sendo que, geralmente seu meio de comunicação é pela porta serial, utilizando um modelo de comunicação baseado em mestre-escravo (Arruda, 2009). O padrão mestre-escravo permite que somente um dispositivo (o mestre) possa iniciar as transações de dados, sendo que, os outros dispositivos (escravos) respondem de acordo com o pedido do mestre, ou de acordo com a tarefa em questão.

O Modbus possibilita um método de comunicação seguro, evitando ao máximo a perda de dados, o que é extremamente importante no meio industrial, visto que um meio de comunicação é comumente alvo de interferências, por conta do ambiente agressivo (Denardin, 2010). Tal protocolo utiliza uma arquitetura mestre-escravo para estabelecer comunicação, onde o mestre envia uma pergunta, ou telegrama, que é composto pelo endereço do dispositivo na rede, o código da função específica de cada dispositivo, os dados referentes à função e a checagem de erros, e o escravo responde com seu endereço, o código da função solicitada, os dados referentes à resposta e a checagem de

erros (Coelho, 2008).

O protocolo Ethernet iniciou sua migração para o ambiente industrial, trazendo consigo todo o potencial dos protocolos TCP/IP utilizados na Internet. Com o uso dessa ferramenta foi possível reduzir custos e elevar a automação na indústria, criando mais precisão e verificação de erros assim como ampliar a complexidade da tarefa a ser realizada por um ou mais equipamentos. O potencial da Ethernet Industrial extrapola sua utilização como rede de comunicação, mais do que o mero emprego de uma tecnologia de rede local de Tecnologia da Informação na área industrial, a Ethernet possibilita a utilização de vários protocolos como TCP/IP, HTTP, SNMP, SMTP, FTP, entre outros (Kurose & Ross, 2010).

Devido à facilidade em se trabalhar com esse tipo de rede e por ser bem consolidada há anos, a Ethernet se tornou alvo da indústria como uma forte alternativa no chão de fábrica e no controle de processos. A implantação das redes Ethernet no âmbito industrial se deu por vários motivos, entre eles pode-se citar a estrutura que segue um padrão uniforme, a capacidade de transportar elevado fluxo de informações, a redução de interfaces, o acesso remoto, serviços da web, o alto desempenho e número ilimitado de dispositivos para conexão.

O objetivo deste trabalho visa permitir a integração das redes Modbus e Ethernet de uma forma didática, facilitando o acesso às estas redes industriais e permitindo sua análise e integração com sensores e equipamentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os protocolos e serviços de cada rede são responsáveis pelo sucesso no processo de comunicação lógica entre os dispositivos integrantes da rede como um todo.

Construiu-se uma plataforma de comunicação Modbus e Ethernet para que todos os testes, estudo e análises pudessem ser realizadas, sendo esta desenvolvida no Laboratório de Controle e Automação, do Campus Alto Paraopeba (CAP) da UFSJ.

Os componentes internos que compõem a plataforma e a mesma completa e construída podem ser visualizados pela Figura 1.

2.1. FIELDLOGGER

Este equipamento é da empresa Novus e é o principal componente da plataforma, além de fazer a aquisição de dados ainda é responsável por ser mestre do barramento Modbus e gateway do barramento para a rede Ethernet. Possui uma IHM (Interface Homem-Máquina) que facilita a operação de algumas configurações e ainda permite ver em tempo real os sensores que foram configurados no barramento e nas suas entradas de dados, além de ser configurável via interfaces: USB (Universal Serial Bus), via barramento Mobus (com o auxílio do adaptador USB→Serial) e também via Ethernet. Todas as informações sobre este equipamento podem ser adquiridas pelo manual do fabricante, disponível no site do fabricante (www.novus.com.br).

2.2. CONTROLADOR N1200

Este equipamento também é da empresa Novus e é o principal escravo da plataforma. É um controlador universal de processos que aceita como entrada uma variedade de sensores e ainda possui um algoritmo de controle PID (Proporcional Integral Derivativo) autoadaptativo sendo possível até configurar sua saída para gerar pulsos em PWM (Pulse Width Modulation). Assim como o FieldLogger, também possui uma IHM, porém mais simples e direta. Para o caso da pesquisa os recursos do controlador foram minimamente utilizados pois o foco escolhido está no funcionamento da rede em si e não em suas funções de controle. Todas as informações sobre este equipamento podem ser adquiridas pelo manual do fabricante, disponível no site do fabricante (www.novus.com.br).

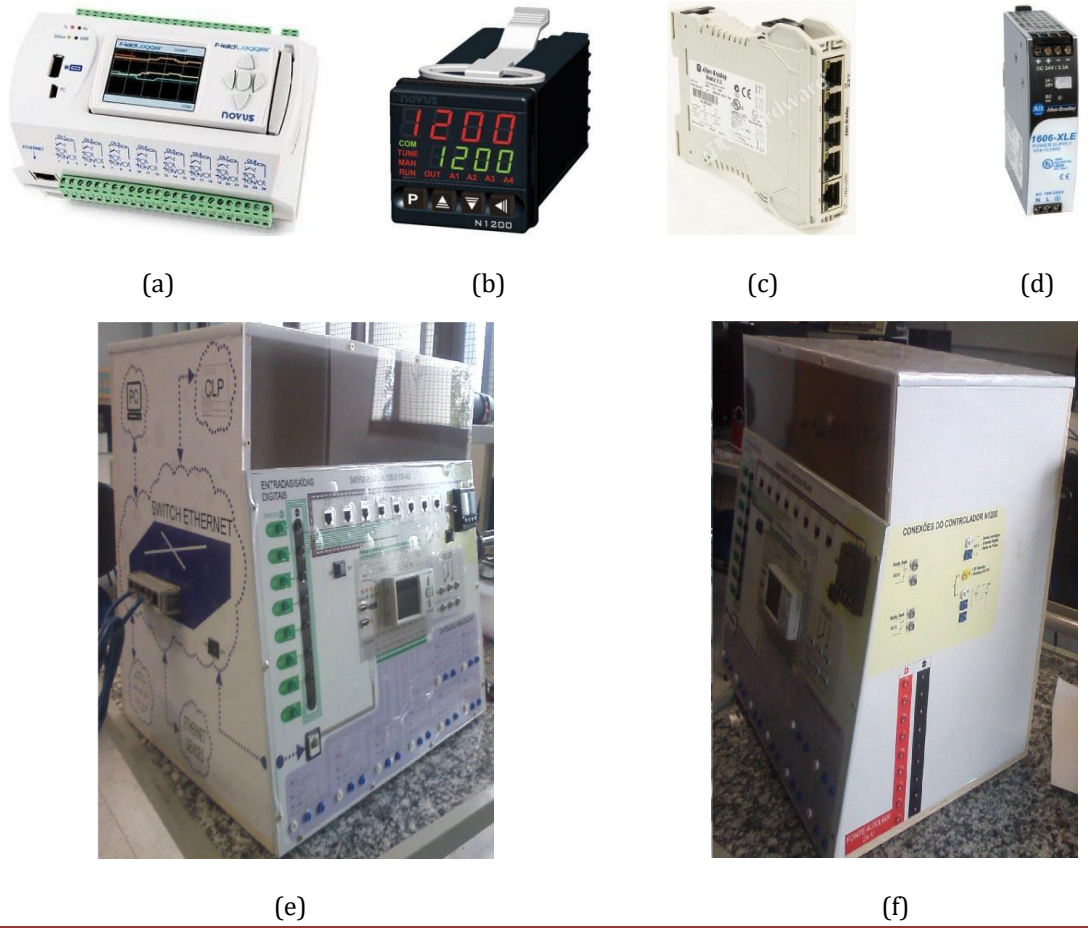
2.3. SWITCH STRATIX 2000

O Switch Stratix 2000 é definido pelo modelo 1783-US05T do fabricante Allen- Bradley. Ele é responsável por possibilitar que mais dispositivos façam a comunicação com o computador servidor na rede Ethernet, além do FieldLogger. A introdução do Switch na plataforma tornou disponível a utilização da mesma junto com outros dispositivos que possuem interface Ethernet, integrando todos os equipamentos presentes no laboratório em uma única rede. Todas as informações sobre este equipamento podem ser adquiridas pelo manual do fabricante, disponível no site do fabricante (www.rockwellautomation.com).

2.4. FONTE

A fonte é definida por um exemplar do modelo 1606-XLE do fabricante Allen-Bradley, fornecendo uma saída de 24V, ela é responsável por alimentar o Switch e externamente foram disponibilizados vários plugues para que sirva de alimentação para os sensores ou quaisquer outros dispositivos que precisem ser alimentados Todas as informações sobre este equipamento podem ser adquiridas pelo manual do fabricante, disponível no site do fabricante (www.rockwellautomation.com).

Figura 1: Componentes internos que compõe a plataforma de estudos em redes industriais (a) FieldLogger, (b) Controlador N1200, (c) Switch, (d) Fonte, (e) Vista lateral esquerda e frontal da plataforma e (f) Vista lateral direita e frontal da plataforma



(a) (b) (c) (d)

(e) (f)

Os desenhos indicativos foram impressos em adesivo e contém informações de como foram feitas algumas conexões internas e indicações de conexões externas para facilitar na hora da montagem quando for utilizada. Internamente o barramento Modbus foi montado em uma placa de circuito, desenhada especificamente para esse propósito, utilizando conectores RJ45 blindados como entradas para receber os componentes externos. Um detalhe importante que pode ser notado na imagem é que a IHM do Fieldlogger, por ser destacável, foi colocada na frente da plataforma facilitando o acesso de quem for utilizar a mesma.

Após a plataforma estar pronta fisicamente foram inseridos outros componentes à rede a fim de realizar testes específicos e confirmar o funcionamento e capacidade de integração da mesma.

2.5. TRANSMISSOR RHT

O transmissor RHT da empresa Novus, modelo RHT-WM-485-LCD, é um sensor de temperatura e umidade que trabalha utilizando o protocolo Modbus RTU e é conectado ao barramento Modbus da plataforma. Todas as informações sobre este equipamento podem ser adquiridas pelo manual do fabricante, disponível no site do fabricante

(www.novus.com.br).

2.6. TERMOPAR TIPO J

É um sensor simples de temperatura que trabalha com diferença de potencial, conectado diretamente à entrada analógica do controlador N1200.

2.7. MICA

O MICA (Módulo de Instrumentação, Controle e Automação) é um módulo fabricado pela empresa "Analogica Instrumentação e Controle" e que tem como componente principal um CLP (Controlador Lógico Programável) modelo CompactLogix L23x da empresa Allen-Bradley, sendo esse responsável pelo controle e comunicação do MICA com o mundo externo através de uma porta Ethernet, por atuadores, similares à plataforma construída, e sensores, que diferentemente da plataforma, já tem sensores embutidos (Braga et al., 2008).

2.8. TESTES REALIZADOS

Utilizando um computador servidor com sistema supervisório instalado e os programas necessários, incluindo o Wireshark (Wireshark, 2025), foram feitos os testes, a configuração dos equipamentos e a observação dos pacotes resultantes das várias comunicações que acontecem na rede.

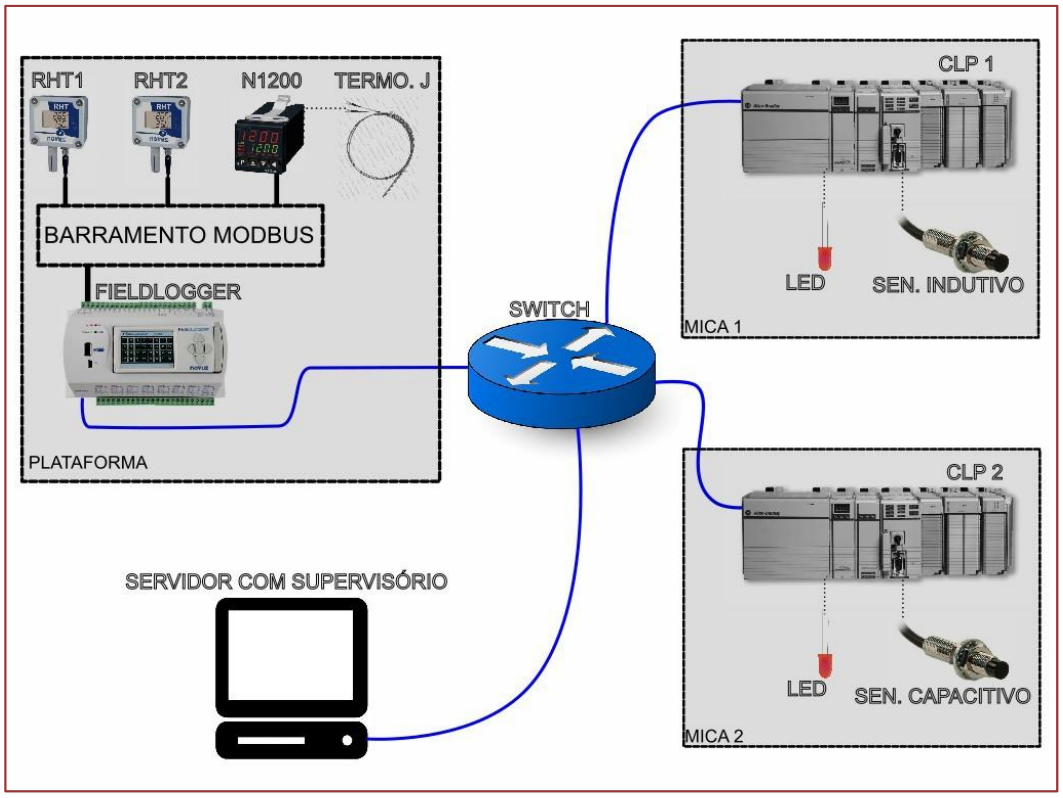
A configuração foi realizada em duas etapas. A primeira é responsável por configurar os parâmetros de firmware dos equipamentos, relaciona a implantação e funcionamento da rede Modbus com a forma como os dados serão passados para a rede Ethernet (gateway). A segunda é responsável por configurar os programas no servidor que receberão e tratarão os dados na rede Ethernet.

Na primeira etapa de configuração é possível escolher a forma como se deseja que a rede Modbus funcione na plataforma, sendo os parâmetros definidos por:

- Arquitetura: como a rede Modbus trabalha apenas com arquitetura mestre/escravo, na configuração dos dispositivos será escolhido o mestre e quais serão escravos;
- Baud Rate: velocidade em bits/segundo que os dados trafegarão na rede;
- Stop Bits: na comunicação serial assíncrona, como é o caso do barramento Modbus que está sendo analisado, é necessário a sinalização do fim da transferência de um sinal de dados para o sistema se preparar para receber o próximo sinal;
- Parity: a paridade é outra forma de checagem de erros na comunicação, relacionada com a quantidade de bits ¨1¨ em cada mensagem enviada pelos dispositivos.

Por fim, a plataforma e os MICAs foram colocados em uma mesma rede a fim de iniciar os testes e provar que podem trabalhar juntos mesmo que internamente utilizem protocolos diferentes. A forma como a rede foi organizada está ilustrada pela Figura 2, sendo que o *switch* foi representado fora da plataforma apenas para facilitar o entendimento de como as conexões foram feitas, mas ele é um componente interno.

Figura 2: Rede criada para realização dos testes da plataforma de comunicação



2.9. SERVIÇOS ETHERNET DA PLATAFORMA

2.9.1. TCP/IP (*TRANSMISSION CONTROL PROTOCOL / INTERNET PROTOCOL*)

Todos os dispositivos na rede precisam ser identificados por um número e este número é padronizado pelo protocolo TCP, sendo chamado de endereço de IP (KUROSE & ROSS, 2010). No serviço de TCP/IP da rede Ethernet podemos escolher trabalhar com IP fixo ou dinâmico realizado pelo protocolo DHCP (Dinamic Host Configuration Protocol).

2.9.2. FTP (*FILE TRANSFER PROTOCOL*), O *FIELDLOGGER* COMO SERVIDOR

O serviço FTP é utilizado como servidor para transferências de arquivos contendo os dados de leituras dos sensores os quais o usuário deseja catalogar em um determinado intervalo de tempo (IETF, 2025).

2.9.3. FTP, O *FIELDLOGGER* COMO CLIENTE

Em contrapartida, nos testes utilizando o Fieldlogger como um cliente FTP, foi configurado para que o equipamento enviasse o arquivo em formato de tabela (MemFlash.csv) e a cada ciclo de tempo, que também foi definido na configuração, atualizasse com os novos dados recolhidos dos sensores, nesse caso apenas utilizando um programa que aceite o formato ¨.csv¨ é possível ver e compreender os dados.

2.9.4. SMTP (*SIMPLE MAIL TRANSFER PROTOCOL*)

O serviço SMTP é responsável por enviar mensagens de e-mail quando acontecem alarmes pré-determinados no monitoramento dos sensores que estão ativos na rede (IETF, 2025). A primeira parte de configuração fica responsável pela autenticação do equipamento no servidor e a segunda por relacionar o e-mail de remetente, com parte da mensagem comum e os destinatários aos quais a mensagem será enviada.

2.9.5. SNMP (*SIMPLE NETWORK MANAGEMENT PROTOCOL*)

O serviço SNMP é responsável por enviar valores de monitoramento e pacotes com exceções de alarme, chamadas de *traps* (IETF, 2025). Utilizando a arquitetura de agente/gerente, onde o agente fica responsável por receber as informações transmitidas pelo gerente.

2.9.6. HTTP (*HYPERTEXT TRANSFER PROTOCOL*)

O serviço HTTP é responsável por gerar páginas de internet, que podem ser visualizadas utilizando um browser, bastando-se digitar o endereço de IP do equipamento na barra de endereços. Na rede testada, os próprios equipamentos já disponibilizam uma interface que é criada automaticamente com algumas informações.

2.10. COMANDOS DE CONTROLE E MONITORAMENTO MODBUS E ETHERNET

Os comandos de controle dos equipamentos da rede, tanto Modbus como Ethernet, precisam ser passados aos mesmos através dos sistemas supervisórios. Eles são os responsáveis por enviar e receber dos equipamentos os comandos de acordo com a função e a rede que o equipamento está localizado.

A comunicação dos MICAs com o supervisório é feita através do Servidor OPC (Open Platform Communications), que é uma plataforma de padronização para dispositivos industriais (OPC, 2025). Ele faz com que diversos dispositivos em redes diferentes possam se comunicar de uma forma universal e é ele quem possibilita a comunicação do sistema supervisório com o CLP na rede estudada.

O software RSLinx, da empresa Rockwell Automation, foi o responsável por possibilitar a criação do servidor OPC DA e permitir que o supervisório se comunique com os CLPs. Todas as informações sobre este software podem ser adquiridas pelo manual do fabricante, disponível no site do fabricante (www.rockwellautomation.com).

3. RESULTADOS

Nos dispositivos testados, todas essas configurações puderam ser feitas utilizando suas IHM´s ou os softwares que o próprio fabricante disponibiliza para cada dispositivo. Na primeira configuração do Fieldlogger utilizou-se a interface USB para comunicá-lo com o computador, assim foi possível ativar a interface Ethernet e passou-se a utilizá-la para alterar os parâmetros que precisavam de ajustes ao longo dos experimentos.

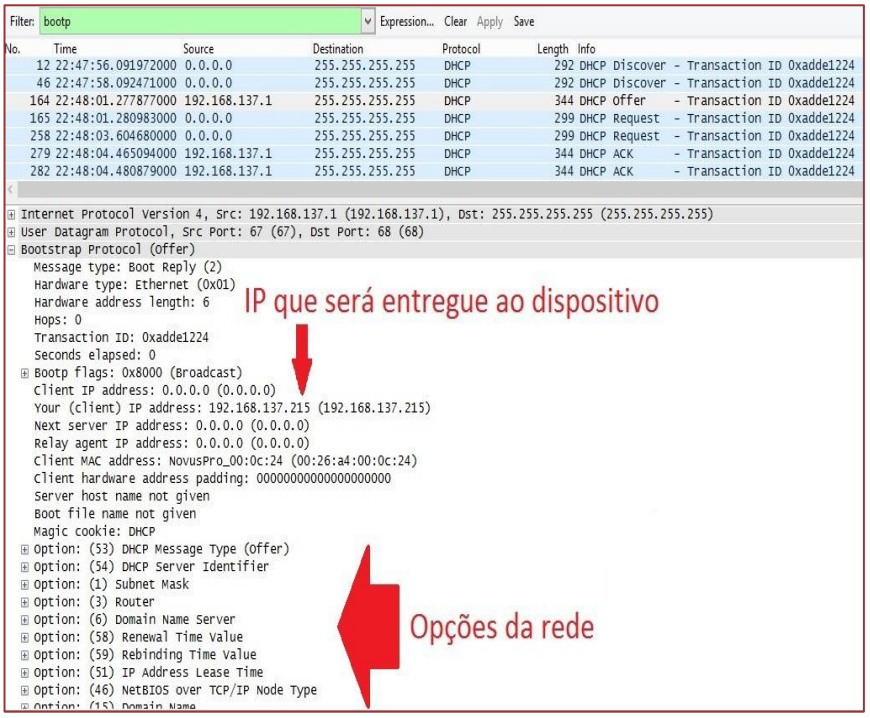
Na configuração da rede Modbus, apenas a escolha da arquitetura que é exclusiva do Fieldlogger e o endereço de cada dispositivo deve ser diferente em cada um. Todos

os outros parâmetros devem ser configurados igualmente, caso contrário a rede não funciona e apresenta problemas de leitura e escrita.

3.1. O SERVIÇO TCP/IP

Para a configuração total da rede, optou-se por utilizar IP fixo, pois os MICAs já utilizavam dessa maneira e facilitaria na identificação de cada equipamento, por exemplo: como os MICAs estavam com endereços ¨192.168.1.101¨ e ¨192.168.1.103¨, optou-se por utilizar ¨192.168.1.100¨ no servidor e ¨192.168.1.53¨ no Fieldlogger, garantindo que sempre que um comando fosse dado para determinado IP seria enviado diretamente para o dispositivo desejado, como ilustrado pela Figura 3. Neste caso, utilizar IP fixo é um facilitador pois a rede é pequena, caso a rede fosse maior e tivesse um fluxo maior de computadores, a aplicação de um servidor DHCP seria uma boa alternativa.

Figura 3: Pacote DHCP do Windows definindo IP para o Fieldlogger

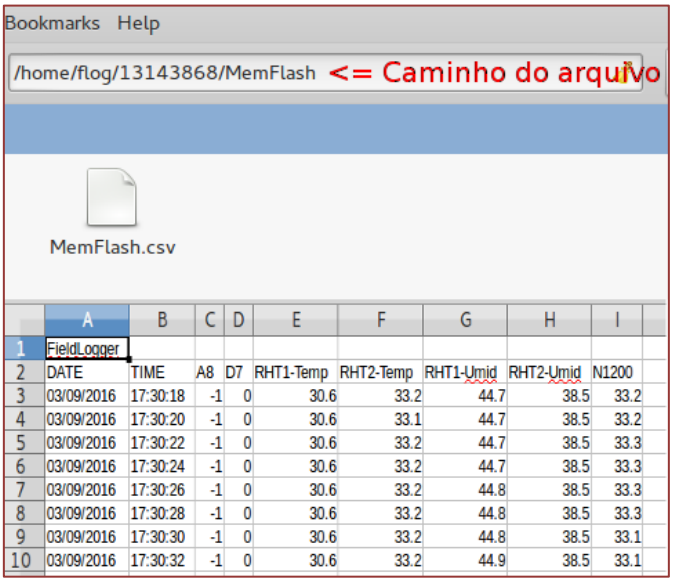


3.2. O SERVIÇO FTP, O FIELDLOGGER COMO SERVIDOR

O equipamento configurado como servidor disponibiliza o acesso aos relatórios a um cliente qualquer na rede. O acesso é feito de forma simples pelo browser, apenas digitando ¨ftp://¨ mais o número de IP do cliente ftp. Os arquivos aparecem e os comandos de copiar e colar podem ser utilizados. Importante salientar que ao utilizar o navegador Mozilla Firefox acontece algum problema relacionado à autenticação de usuário, desconfia-se que possa ser solucionado com instalação de algum plugin extra, mas isso não foi testado. Os outros browsers apresentam funcionamento normal e acessaram corretamente o FieldLogger. O acesso também pode ser feito através do programa FileZilla, um cliente gratuito de FTP, muito comum e de fácil configuração.

Vale notar que nos dois casos, o arquivo do Fieldlogger acessado é um arquivo de memória denominado ¨MemFlash.csv¨, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Caminho do arquivo de memória ¨MemFlash.csv¨ e seu conteúdo extraído



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	FieldLogger								
2	DATE	TIME	A8	D7	RHT1-Temp	RHT2-Temp	RHT1-Umid	RHT2-Umid	N1200
3	03/09/2016	17:30:18	-1	0	30.6	33.2	44.7	38.5	33.2
4	03/09/2016	17:30:20	-1	0	30.6	33.1	44.7	38.5	33.2
5	03/09/2016	17:30:22	-1	0	30.6	33.2	44.7	38.5	33.3
6	03/09/2016	17:30:24	-1	0	30.6	33.2	44.7	38.5	33.3
7	03/09/2016	17:30:26	-1	0	30.6	33.2	44.8	38.5	33.3
8	03/09/2016	17:30:28	-1	0	30.6	33.2	44.8	38.5	33.3
9	03/09/2016	17:30:30	-1	0	30.6	33.2	44.8	38.5	33.1
10	03/09/2016	17:30:32	-1	0	30.6	33.2	44.9	38.5	33.1

3.3. O SERVIÇO FTP, O FIELDLOGGER COMO CLIENTE

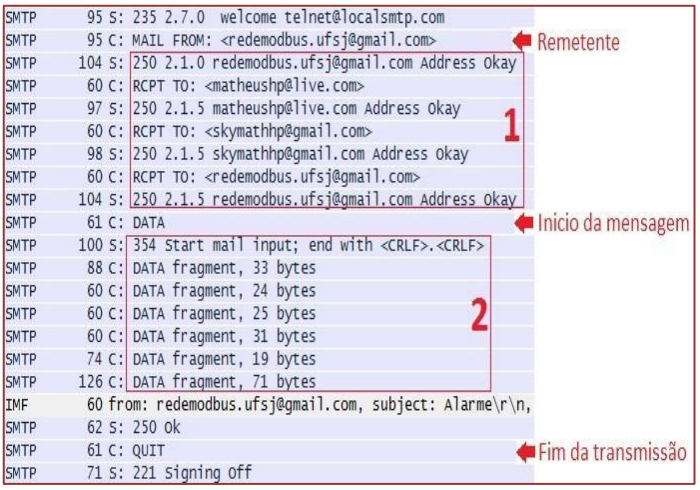
A configuração para fazer o equipamento se comportar como um cliente, transferindo seus arquivos para algum servidor que está conectado na rede, faz a transferência em horários programados uma vez por dia ou de forma periódica. Uma vez que existe um servidor em algum dispositivo na mesma rede é possível acessar os arquivos utilizando o protocolo em qualquer horário e quantas vezes for necessário. Assim que a instalação do servidor virtual FTP termina é criada uma pasta na raiz do sistema com o nome ¨inetpub¨, dentro dela estão todas as pastas que o servidor usa para seus serviços, incluindo a pasta do servidor FTP para onde os arquivos são enviados. Esse servidor fica ativo, escutando todas as requisições na porta 21 e quando o equipamento faz a requisição, o servidor permite que os dados sejam transferidos e salvos na pasta do servidor cujo nome é o código serial do Fieldlogger.

3.4. O SERVIÇO SMTP

Durante a pesquisa foi notado que o equipamento FieldLogger não possuía nenhum tipo de criptografia, fazendo as requisições e transferências de mensagens utilizando autenticação codificada em “base64” sobre “AUTH LOGIN”, que é uma forma totalmente insegura e inaceitável para os servidores de e-mail que existem na internet atualmente. A solução foi criar um servidor de e-mails que recebesse essa mensagem sem criptografia pela rede interna e enviasse com segurança para o servidor principal na internet.

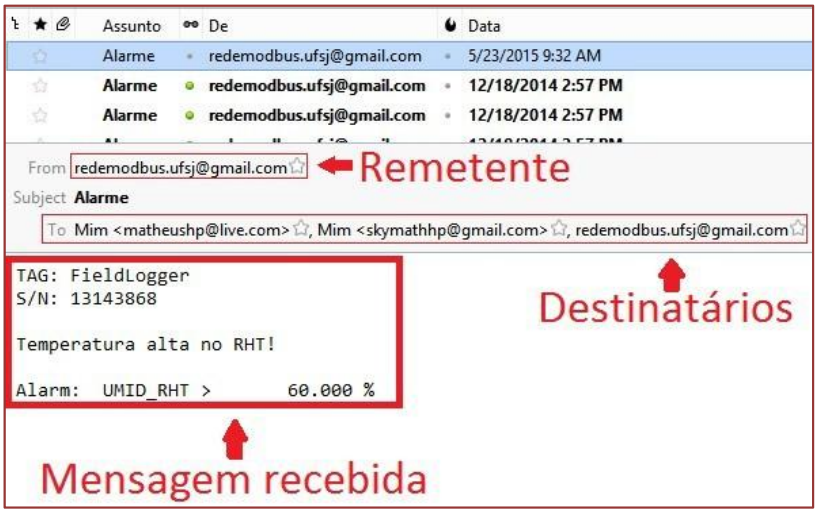
A comunicação do serviço SMTP na rede interna foi feita na porta 25 do servidor, tendo como base comandos no padrão Telnet (IETF, 2025), para autenticação do usuário, transcrição da mensagem de e-mail e endereço dos destinatários que receberão a mensagem, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5: Trecho da captura da transferência SMTP



Nessa etapa, as mensagens foram entregues corretamente ao servidor, mas por algum motivo que não foi possível determinar, nos dois sistemas elas pararam de ser enviadas aos destinos externos de internet. Suspeita-se de alguma mudança da política de privacidade do servidor da conta de e-mails (Gmail), mas nas primeiras vezes que o protocolo foi testado funcionou normalmente, entregando os e-mails nas devidas contas externas, como pode ser visto na imagem da Figura 6.

Figura 6: Emails recebidos em transferência SMTP realizada pela rede

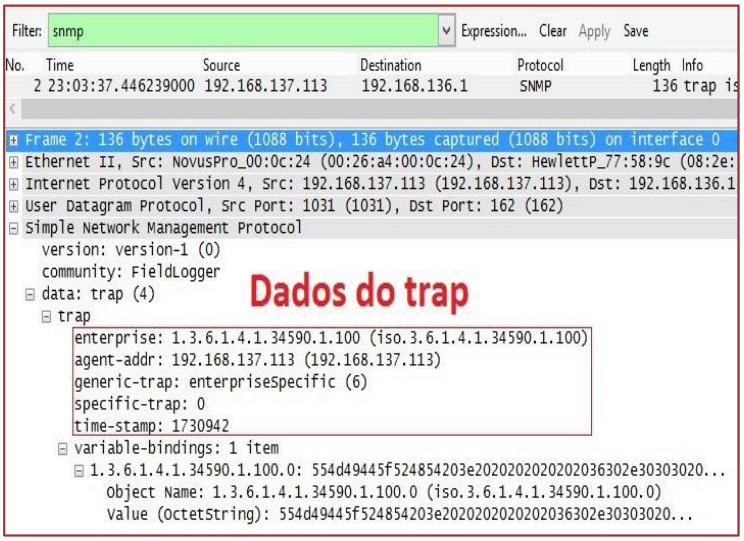


3.5. O SERVIÇO SNMP

Na rede testada o agente é o sistema supervisório instalado no computador e o gerente é o FieldLogger, que recebe os valores dos escravos e transfere ao agente, assim como algumas informações próprias como quantidade de memória disponível para registro de monitoramento e versão do firmware instalado, conforme ilustra a Figura 7. Utilizou-se a porta 161 para leitura dos dados e 162 para envio dos traps de alarmes.

Aparentemente o SNMP apresentou uma enorme versatilidade, sendo muito usado em sistemas de monitoramento, mas apresentou um grande desafio de implementação, por dificuldade de se encontrar bibliografia sobre o assunto de uma forma mais prática e específica, os manuais do fabricante não são muito claros nesse aspecto, como medida se escolheu procurar os valores das OIDs (Object Identifier) desejadas dentro do arquivo MIB (Management Information Base) fornecidos pelo fabricante e após isso colocá-las uma a uma para serem monitoradas pelo sistema supervisório.

Figura 7: Exemplo de pacote trap capturado com Wireshark em teste realizado usando o SNMP



3.6. O SERVIÇO HTTP

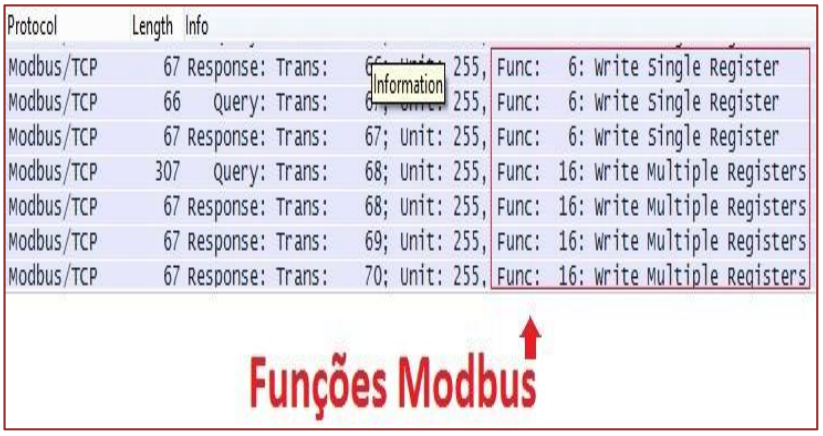
No caso do FieldLogger apareceram as *tags* dos escravos, parâmetros do mestre e alarmes que foram configurados previamente. A página é configurada com um tempo de recarregamento para ir atualizando as informações sobre as *tags*, conforme apresenta a Figura 8.

Figura 8: Pacotes capturados na requisição da página pelo serviço HTTP

3.7. COMANDOS DE CONTROLE E MONITORAMENTO MODBUS E ETHERNET

No caso dos equipamentos Modbus, pelo mestre da rede ser o Fieldlogger e este estar trabalhando como um gateway para a Ethernet, todos os comandos chegam a ele em pacotes Modbus TCP são desencapsulados e enviados como Modbus RTU aos devidos escravos (Modbus, 2025), como pode ser observado pela Figura 9.

Figura 9: Pacotes capturados no envio de comandos Modbus



Já no lado dos MICAs, os únicos pacotes em trânsito na rede são os CIP (Common Industrial Protocol), como pode ser observado pela Figura 10, sendo estes responsáveis por realizar a comunicação do sistema supervisório com o servidor OPC e desse com os CLPs dos MICAs.

Figura 10: Pacotes capturados no envio de comandos ao MICA

Source	Destination	Protocol	Length	Info
192.168.1.110	192.168.1.103	CIP CM	114	Unconnected Send: Get Attribute All
192.168.1.103	192.168.1.110	TCP	60	44818→2069 [ACK] Seq=54 Ack=115 Win=4060 Len=0
192.168.1.103	192.168.1.110	CIP	130	Success
192.168.1.110	192.168.1.103	CIP CM	120	Unconnected Send: Unknown Service (0x4c)
192.168.1.103	192.168.1.110	CIP	174	Success
192.168.1.110	192.168.1.103	CIP CM	114	Unconnected Send: Get Attribute All
192.168.1.103	192.168.1.110	CIP	130	Success
192.168.1.110	192.168.1.103	CIP CM	120	Unconnected Send: Unknown Service (0x4c)
192.168.1.103	192.168.1.110	CIP	102	Success

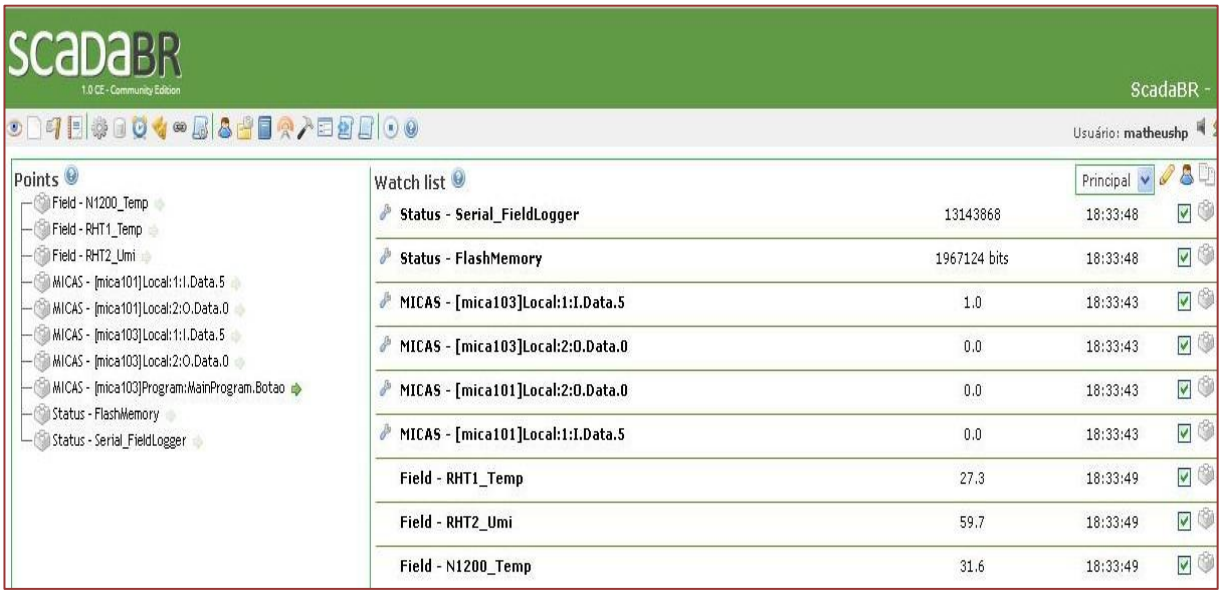
A primeira tentativa de configuração foi realizada com o software de sistemas supervisórios “Elipse Scada” da empresa “Elipse Software”. Porem, na tentativa de configuração dos *drivers* “Modbus”, não foi possível obter êxito através da interface Ethernet, apenas aplicando comandos via USB, pois, na rede proposta, o Fieldlogger, que está dentro da plataforma de comunicação, deve se comportar como um gateway da interface Ethernet para a Modbus. No software Elipse Scada existe a opção de utilizar o sistema supervisório como mestre ou como escravo, mas nenhum dos dois *drivers* foram capazes de ler ou escrever nos dados do Fieldlogger, apenas via interface USB.

Ja com o software Superview também da empresa Novus, como já era esperado, os equipamentos da plataforma tiveram uma completa compatibilidade e inclusive obteve-se sucesso configurando uma rede Ethernet de multi-mestre, onde tanto o supervisório como o Fieldlogger funcionaram como mestres e foi possível enviar comandos ao Fieldlogger. Porém, o software não foi compatível com o protocolo utilizado nos MICAs, e com isso, não foi possivel obter pelo supervisório, comunicação com os dispositivos que não são da empresa fabricante. Por último, a solução encontrada foi utilizar um software que fosse de código livre e atendesse pelo menos em parte as duas redes estudadas e o software SCADABR foi o que obteve os melhores resultados.

Após instalado o SCADABR e as configurações de segurança do servidor ajustadas, passou a ser possível visualizar o RSLinx como uma opção de OPC DA e foi possível criar *tags* de controle e monitoramento, assim como era feito diretamente no Elipse Scada. Além de possibilitar a utilização do SCADABR essas alterações indiretamente fizeram com que o OPC DA, criado no RSLinx, em um computador atuando como servidor da rede, pudesse ser acessado de qualquer outra máquina na rede, permitindo até que uma máquina em ambiente Linux, com o SCADABR instalado, fizesse acesso ao OPC DA, controlasse e monitorasse os MICAs através do protocolo CIP.

Por fim, o monitoramento na plataforma de comunicação foi realizado nos dois RHTs da rede, acessando seus valores de temperatura e umidade, além de acessar o valor do termopar tipo J, conectado ao controlador N1200, conforme pode ser visualizado pela Figura 11. Os MICAs tiveram dois sensores monitorados e dois atuadores controlando leds.

Figura 11: Tela principal de monitoramento do SCADABR



4. CONCLUSÕES

Após a realização de todos os testes e montagens ficou claro que as duas redes demonstraram capacidade e versatilidade tanto para desenvolvimento de soluções, quanto para possibilitar o entendimento de redes industriais.

As características da plataforma de comunicação comparada aos MICAs se apresentam mais flexíveis, em relação ao sistema supervisório, por não necessitar de um servidor OPC e permitir envio imediato dos comandos, graças ao encapsulamento dos pacotes Modbus RTU em Modbus TCP. Ao mesmo tempo, isso é um dificultador ao acesso à supervisão em computadores que estejam fora da rede da plataforma.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de uma pesquisa realizada com fomento, através de bolsa de Iniciação Tecnológica, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através da Chamada PIBITI-FUNTTEL. Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES, CNPq e ao Fundo Tecnológico das Telecomunicações (FUNTTEL), pelo apoio financeiro e à UFSJ/CAP pela infraestrutura disponibilizada, sem os quais esta pesquisa não poderia ter sido realizada.

REFERÊNCIAS

[1] ARRUDA, T. A. Rede de Instrumentação para Aplicação em Controle. Belo Horizonte, 2009. BRAGA, A. R.; PASSOS, Lúcio F. D.; GIACULI JÚNIOR, C.; BRAGA, C. M. P. Projeto e

[2] implementação de um módulo didático para abordagem integrada de instrumentação, controle e automação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 2008. Anais [...].

[3] COELHO, M. S. Redes de Comunicação Industrial Padrões Industriais. Cefet-SP, Janeiro, 2008. DENARDIN, G. W. Protocolo Modbus em Linha Serial. Universidade Tecnológica Federal do Para-ná (UTFPR). 2010.

[4] IETF. THE INTERNET ENGINEERING TASKFORCE. Disponível em: <http://tools.ietf.org/>. Acesso em: 23 mai. 2025.

[5] GUARESE, G. B. M. Arquitetura híbrida de comunicação para ambientes de automação industrial: Protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485. Porto Alegre, 2011.

[6] KOBAYASHI, T. H. Uma ferramenta de manipulação de pacotes para análise de protocolos de redes industriais baseados em TCP/IP. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

[7] KUROSE, James F. & ROSS, Keith W. Computer Networking: a Top-Down Approach. 5ª ed., Edition, Pearson, 2010.

[8] MODBUS ORGANIZATION. Modbus. Disponível em: <http://www.modbus.org>. Acesso em: 23 mai. 2025.

[9] MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. Engenharia de automação industrial. Editora LTC. 2ª Edição. Rio de Janeiro, 2007.

[10] OPC FOUNDATION. What is OPC. Disponível em: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc//>. Acesso em: 26 mar. 2025.

[11] SCHNEIDER ELETRIC. Redes de Comunicação Industrial. Documento Técnico nº 2. Edição Setembro, 2007.

[12] WIRESHARK FOUNDATION. Wireshark. Disponível em: <https://www.wireshark.org>. Acesso em: 10 mai. 2025.

Capítulo 6

Máquinas Elétricas Rotativas: ensaios e simulações computacionais

Allan David da Costa Silva
Igor Cavalcante Torres
Amanda Santana Peiter
Alana Kelly Xavier de Barros Branco
Estevão de Lima Malta da Silva
Carlos Eduardo Ribeiro da Silva Pereira
José Nilton Vieira dos Santos Junior

Resumo: Este capítulo reúne o roteiro de aulas práticas essenciais ao conteúdo da disciplina de Máquinas Elétricas. Ele foi elaborado ainda na primeira turma do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Alagoas, a partir da colaboração entre professores, alunos, técnicos e de outras instituições. Os experimentos descritos neste livro podem atender às demandas de cursos que dispõem de pouca infraestrutura laboratorial, oferecendo alternativas didáticas que empregam *softwares* e equipamentos mais simples. Em cada seção há um texto introdutório apresentando os objetivos, a fundamentação teórica, o procedimento experimental e alguns problemas sugeridos, de forma a alcançar a melhor clareza dos modelos físicos e matemáticos utilizados na teoria das máquinas rotativas.

Palavras-chave: experimentos, campo girante, laboratório de máquinas elétricas.

1. INTRODUÇÃO

O armazenamento de energia elétrica ainda enfrenta problemas práticos que o tornam incompatível com a atual demanda energética. Portanto, a energia elétrica deve ser gerada no momento em que será consumida. Ao longo do tempo, o sistema elétrico de potência passou a operar de forma interconectada, de forma a satisfazer essa necessidade.

No Brasil essa estrutura é denominada de Sistema Interligado Nacional (SIN), um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e múltiplos proprietários. Essa operação interligada agrega uma série de vantagens ao país. A primeira delas é que a geração pode ocorrer em diferentes épocas do ano, onde houver fontes de energia disponíveis. Ao considerar o Brasil como um país de extensão continental, isso assegura a continuidade do serviço.

A segunda grande vantagem é que as geradoras podem atender cargas variáveis, mantendo tensão e frequência constantes. Isso graças aos diversos geradores que alimentam a rede, o que, em geral, é modelado como uma barra infinita em estudos de fluxo de carga. Por fim, a maior dessas vantagens, é que a energia elétrica pode ser consumida a qualquer momento e em qualquer ponto do SIN, por um custo econômico razoável.

O processo de conversão de energia, em geral conhecido como geração, é realizado quase exclusivamente por meio de geradores síncronos de alta potência, ou alternadores, cujo projeto dependerá do tipo de força motriz, normalmente vapor, gás ou água.

O termo "máquinas síncronas" está associado ao fato do rotor, parte rotacional dessas máquinas, girar a uma velocidade sincronizada com a velocidade do campo magnético girante, fenômeno físico que será explorado na segunda seção deste material. Nesse ponto, o leitor deve atentar para o fato de que, a depender do número de polos da máquina, a velocidade mecânica poderá ser inferior, mas ainda proporcional, à frequência da rede. Isso torna a operação dos grandes geradores factível. Esse termo também pode ser empregado nas máquinas operando como motor. A diferença está, essencialmente, no sentido do fluxo de potência da máquina.

Quanto aos aspectos construtivos dessas máquinas, há duas possibilidades. Na primeira delas o enrolamento de excitação é disposto no rotor, o qual é alimentado por Corrente Contínua (CC) para produzir um campo magnético constante, ou emprega um conjunto de ímãs permanentes para realizar essa tarefa. Essa é a denominada máquina de campo móvel, em que a tensão alternada é induzida a partir do fluxo concatenado no enrolamento de armadura.

Há também as máquinas de campo fixo, nas quais o enrolamento de excitação é disposto no estator e, o enrolamento armadura no rotor, uma forma pouco comum para este tipo de máquina.

Para que esses geradores sejam conectados ao SIN, a velocidade de giro do rotor, impulsionada por uma fonte primária de energia, deve ser controlada até atingir a frequência da rede, em geral 50 ou 60 Hz, a depender do país e a tensão de excitação deverá ser gradativamente ajustada até que a tensão nos terminais da máquina esteja sincronizada, em fase e magnitude, com a tensão do sistema elétrico de potência. Em geral, isso é feito com o auxílio de um sincronoscópio (veja como isso é feito em uma usina em Alagoas: shre.ink/EmSincronismo).

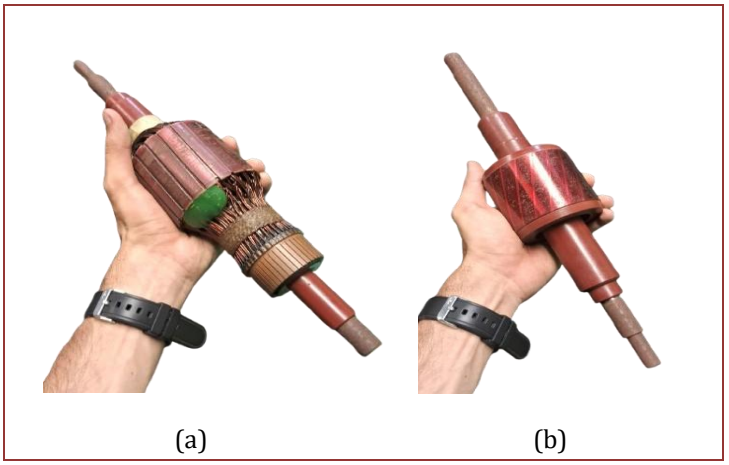
Também é possível que esses geradores operem de forma isolada, havendo a necessidade de um sistema de controle para ajustar os parâmetros de entrada do gerador no momento em que há mudanças na carga. Essa dinâmica de operação será abordada na Seção 6.

Já quando se trata dos motores síncronos, o primeiro ponto a se destacar é que eles possuem torque de partida nulo, então, não partem de forma independente. Há a necessidade de uma força de propulsão externa para que a sua velocidade alcance a frequência da rede, caso contrário a interação com campo magnético gerado no estator da máquina resultará em vibrações mecânicas. Além disso, ele deve partir sem carga e com o circuito de excitação seccionado, o que evita que a fonte de alimentação seja danificada por tensões induzidas no circuito de excitação. A principal aplicação dessa máquina é como compensador síncrono em subestações de energia, controlando o fluxo de reativos do sistema elétrico de potência.

Quanto às máquinas assíncronas, conhecidas principalmente como Motores de Indução Trifásicos (MIT) devido a sua principal aplicação, são máquinas amplamente difundidas na indústria, dada a sua robustez, seus aspectos construtivos simples, baixo custo econômico e praticidade.

Diferente das máquinas síncronas, elas não apresentam um circuito de excitação independente. O seu princípio de funcionamento se baseia no escorregamento entre velocidade síncrona e a velocidade de giro, o que resulta em um torque induzido no eixo. Portanto, essas máquinas apresentam torque e corrente elevados na partida. Esse é o motivo pelo qual muitos cursos dedicam uma disciplina ao estudo de diferentes formas de partir essas máquinas, evitando problemas com a rede elétrica, o que será visto na Seção 8. Nos motores de indução há dois tipos principais de rotores. O primeiro deles é o bobinado, Figura 1 (a), o qual permite acesso aos enrolamentos, possibilitando maior controle sobre a partida. Em geral, ele apresenta um custo mais elevado. O segundo é o gaiola de esquilo, apresentado na Figura 1 (b), um tipo de rotor de baixo custo, formado por lâminas empilhadas entre anéis de curto-circuito, que atravessam o pacote do rotor. Ele é o responsável pela ampla disseminação dessas máquinas na indústria, atualmente superando as máquinas CC.

Figura 1: Rotores. (a) Rotor bobinado. (b) Rotor gaiola de esquilo



(a) (b)

Fonte: Autoria própria.

Nas máquinas CC, ou comutadores, a tensão alternada interna é convertida em contínua, a partir de um mecanismo denominado comutador. Diferente das máquinas em corrente alternada, no estator do comutador há sempre o circuito de excitação.

Antes dos avanços na eletrônica de potência e, portanto, no acionamento de motores de indução, os motores CC se destacavam pela ampla faixa de velocidade, configurando-se como uma alternativa insuperável para o controle de velocidade, tendo em vista que ela pode ser controlada por meio da tensão aplicada (Chapman, 2023).

Esses motores podem ser aplicados em veículos elétricos, equipamentos eletrônicos e aeromodelos. A decisão deverá sempre considerar a necessidade da aplicação. Os principais motores CC são: motor CC de ímã permanente, motor CC série, motor CC composto e, os principais geradores são: gerador CC em derivação, série, composto e diferencial.

No motor *shunt*, o enrolamento de campo está ligado em paralelo com a sua armadura. Uma das características desse tipo de motor é que a sua velocidade é quase constante com a carga de carga, o que o torna uma alternativa quando se quer uma rotação estável.

No motor série, por outro lado, o enrolamento de campo está em série com a armadura, portanto a mesma corrente flui por esses dois enrolamentos. Isso resulta em um alto torque na partida, entretanto dificulta o controle de velocidade, a qual diminui com o aumento da carga. Esse motor é denominado motor universal, uma vez que também pode ser alimentado por corrente alternada, portanto, um motor monofásico de baixa potência com aplicações residenciais típicas, como, por exemplo, furadeiras, aspiradores e liquidificadores.

Os motores monofásicos utilizam apenas uma fase, portanto, eles não apresentam um campo girante na partida, por isso, há algumas configurações para iniciar a partida: motor de polos sombreados, motor monofásico de fase dividida, motor com capacitor de partida e motor com capacitor permanente. Cada configuração apresenta rendimento e torque proporcionais ao custo.

1.1. RECOMENDAÇÕES GERAIS

Durante as aulas práticas, os alunos devem, sem exceção:

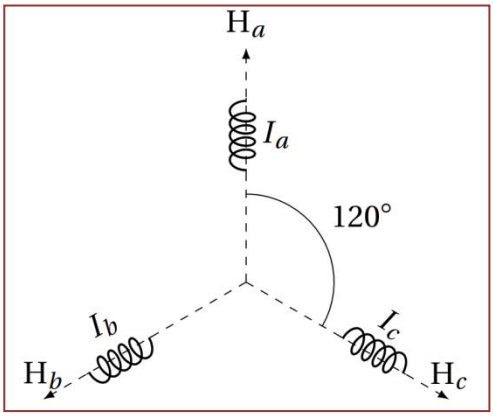
- Vestir roupas adequadas durante a realização do experimento:
  - Camisa de manga, sapato fechado e ausência de acessórios metálicos;
- Realizar a leitura prévia do guia;
- Manter-se com o guia durante a realização do experimento:
  - Impresso ou em ferramenta digital;
- Seguir as instruções do técnico de laboratório e do professor da disciplina;
- Não ligar os equipamentos sem autorização;
- Discutir com o professor os aspectos técnicos e científicos referentes à aula.

2. O CAMPO GIRANTE

Neste experimento o objetivo é observar a geração do campo girante. Compreender o conceito de campo girante é fundamental para analisar o funcionamento de máquinas elétricas rotativas. Segundo Chapman (2013), quando correntes trifásicas equilibradas circulam pelo enrolamento de armadura de uma máquina, elas produzem um campo magnético resultante rotativo em torno do eixo da máquina com velocidade $\boldsymbol{\omega}$, denominada velocidade síncrona. Essa velocidade depende da frequência da corrente elétrica e do número de polos da máquina.

Para um melhor entendimento, considere um sistema trifásico com três bobinas defasadas 120° no espaço, conduzindo correntes defasadas 120° no tempo, conforme a Figura 2.

Figura 2: Defasagem espacial de um conjunto de 3 bobinas



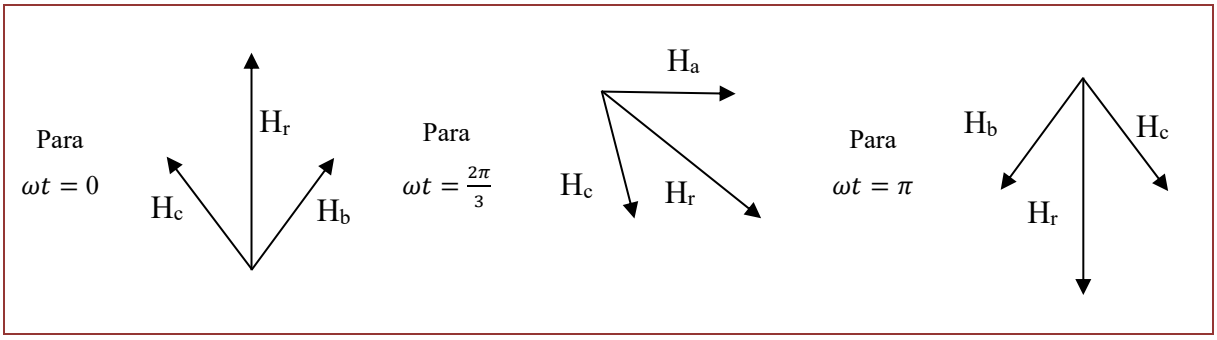
Fonte: Adaptado de Seixas (2016).

Considerando a sequência de fase positiva, tem-se as Equações (1) a (6):

$$I_a = I \cdot sen(\omega t), \quad (1)$$
$$I_b = I \cdot sen(\omega t - 120°), \quad (2)$$
$$I_c = I \cdot sen(\omega t + 120°), \quad (3)$$
$$H_a = H \cdot sen(\omega t), \quad (4)$$
$$H_b = H \cdot sen(\omega t - 120°), \quad (5)$$
$$H_c = H \cdot sen(\omega t + 120°). \quad (6)$$

A representação fasorial desse fenômeno está apresentada no Quadro 1:

Quadro 1: Representação gráfica do campo girante



Note que a intensidade do campo resultante possui módulo constante e gira em sentido horário, com velocidade angular ω.

2.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

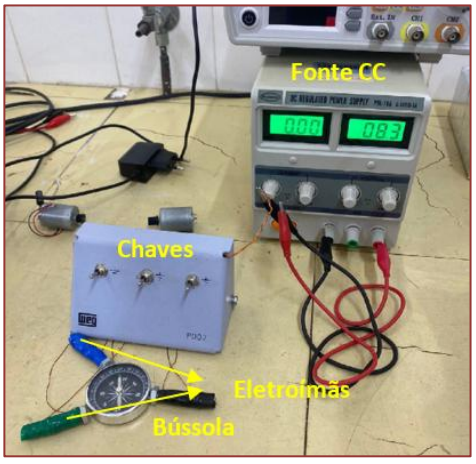
Para este experimento, são necessários uma bússola, uma fonte de alimentação CC, três chaves comutadoras e três eletroímãs. Para cada eletroímã, enrole um condutor de cobre em torno de um prego de aço, que atuará como núcleo magnético. Recomenda-se realizar pelo menos três voltas para gerar um campo magnético de intensidade razoável.

2.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Posicione a bússola no centro de uma circunferência, ela fará o papel de rotor. Ao redor da bússola, posicione 3 eletroímãs defasados espacialmente de 120°, eles farão o papel do enrolamento do estator da máquina.

Cada eletroímã deve ser alimentado por uma corrente CC e seccionado por meio de uma chave independente. Note que, neste caso, há um norte magnético fixo. Essa configuração pode ser observada na Figura 3.

Figura 3: Configuração do experimento



Fonte: Autoria própria.

Conecte os eletroímãs à fonte CC e realize movimentos coordenados sequencialmente, abrindo e fechando as chaves, de forma a gerar um norte magnético por vez. O resultado esperado é que a agulha da bússola gire, acompanhando o campo magnético.

Sugestão

- Utilize um gerador de sinais com três saídas. Conecte os eletroímãs a três senoides com mesma amplitude, defasadas 120° entre si. A frequência do sinal deve ser baixa, permitindo o giro da bússola.

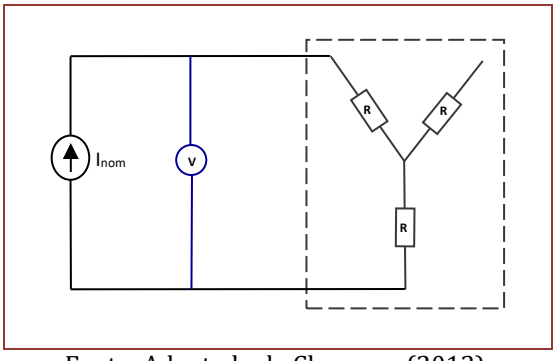
2.3. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. Explique o campo girante e faça uma analogia entre o experimento e o campo girante de uma máquina trifásica.
2. Explique, de forma gráfica, o efeito da inversão da sequência de fases no campo girante.

3. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ARMADURA

Neste experimento o objetivo é determinar a resistência do enrolamento de armadura de um gerador síncrono. Nas máquinas rotativas, as perdas no cobre são dadas pelo produto do quadrado da corrente elétrica pela resistência. Para estimar essa resistência e, portanto, computar essas perdas, tipicamente, aplica-se uma fonte CC entre terminais da máquina e, em seguida, mede-se a tensão, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4: Ensaio CC para medição de resistência de enrolamento



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

A corrente deve ser ajustada ao valor nominal da máquina, como uma forma de aquecer os enrolamentos à mesma temperatura de operação, tendo em vista que a resistência elétrica é dependente da temperatura.

Tipicamente, as perdas são especificadas para uma temperatura de 75 °C (Jordão, 1977). Isso pode ser feito por meio da equação (1) (Boylestad, 2013):

$$R_{75} = \frac{234{,}5+75}{234{,}5+T} \cdot R, \qquad (1)$$

Em que,

- R_{75} é a resistência à 75 °C, em Ω;
- 234,5 é o módulo da temperatura absoluta inferida do cobre;
- T é a temperatura ambiente;
- R é a resistência medida, em Ω.

Esse procedimento resulta em uma estimativa razoável, dado que a CC suprime o efeito da reatância síncrona. Entretanto, essa abordagem possui falhas. Uma delas é que em CC não há o efeito pelicular, portanto, a resistência medida será inferior à resistência da máquina em operação. Dessa forma, a estimativa das perdas será inferior à que ocorre durante o funcionamento da máquina. Essa diferença será incorporada às perdas suplementares.

3.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Para este experimento, são necessários: um transformador de experimentos; um alternador trifásico (220Δ/380Y V, 2,9/1,7 A) e dois multímetros digitais.

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nota: Procedimento adaptado do manual técnico De Lorenzo – GTU101.1.

i. Conecte os equipamentos conforme a Figura 4.

ii. Faça a medição da temperatura do estator:

$$T = ___\ °C.$$

iii. Ajuste a corrente nominal e, em seguida, preencha a Tabela 1.

Tabela 1: Tensão CC entre os terminais para corrente nominal

Terminais	Tensão (V)
UV	
VW	
WU	

iv. Calcule os valores das resistências:

$$2R = \frac{V_{CC}}{I_{CC}}.$$

v. Estime o valor médio das resistências entre os terminais:

$$Rav = \frac{R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}}{3} = ____\ \Omega.$$

vi. Calcule a resistência à 75 °C.

Na Figura 5 é possível observar a imagem do ensaio CC.

Figura 5: Realização do ensaio CC

Fonte: Autoria própria.

3.3. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. Esse procedimento é válido para o fechamento em estrela. Como deve ser feito se o fechamento estiver em delta? As mesmas equações são válidas?

4. ENSAIO A VAZIO

Neste experimento os objetivos são: determinar as perdas mecânicas e no ferro do alternador, bem como, determinar a curva de circuito aberto para a velocidade nominal.

O ensaio de circuito aberto em um gerador síncrono é realizado com o objetivo de se obter a Característica a Vazio (CAV) da máquina, bem como estimar as perdas mecânicas e no núcleo. Para tanto, o alternador deve girar em velocidade nominal, com os terminais do circuito de armadura em aberto, então, mede-se a tensão nesses terminais com o aumento da corrente de campo.

A tensão medida corresponde à tensão de armadura da máquina, uma vez que a corrente é zero. A curva resultante desse ensaio apresenta um comportamento inicialmente linear até o momento em que o material atinge a saturação magnética (Chapman, 2013).

4.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

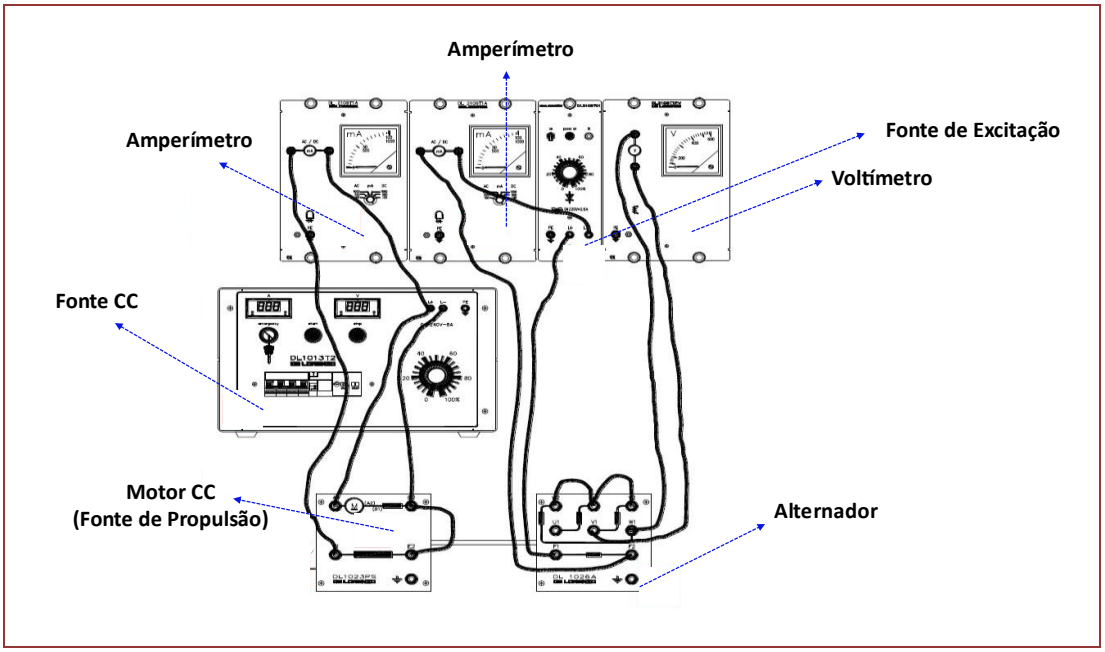
Neste experimento são necessários: um alternador trifásico (220Δ/380Y V, 2,9/1,7 A, 3600 rpm); um motor CC 220 V, utilizado para acionar o alternador; dois multímetros digitais; um tacômetro digital, uma fonte CC e uma fonte de excitação para o campo do alternador.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nota: Procedimento adaptado do manual técnico De Lorenzo – GTU101.1.

I. Monte o ensaio conforme o diagrama apresentado na Figura 6.

Figura 6: esquemático aplicado no ensaio de circuito aberto



Fonte: Adaptado de De Lorenzo.

II. Ainda desacoplado, coloque o motor CC para girar na velocidade nominal do alternador e aguarde até que ele esteja aquecido (veja como isso pode ser feito: shre.ink/Temperatura). Em seguida, realize a medição da corrente (I_M) e tensão (U_M) fornecidas pela fonte CC:

$$I_{M1} = ____ \text{ A}, \qquad U_{M1} = ____ \text{V}.$$

III. Calcule a potência demandada pelo motor CC (P_{M1}):

$$P_{M1} = U_{M1} \cdot I_{M1} = ____ \text{W}.$$

IV. Acople o motor CC ao alternador em sua velocidade nominal, mas não excite o gerador. Em seguida, realize novamente a medição de I_M e U_M:

$$I_{M2} = ____ \text{ A}, \qquad U_{M2} = ____ \text{V}.$$

V. Calcule a potência absorvida pela armadura do motor (P_{M2}):

$$P_{M2} = U_{M2} \cdot I_{M2} = ____ \text{ W},$$

VI. a diferença entre essas potências calculadas nessas primeiras situações representa as perdas mecânicas (P_{Gm}) do alternador:

$$P_{Gm} = P_{M1} - P_{M2} = ____ \text{ W}.$$

VII. Excite o alternador de forma a gerar a sua tensão nominal (veja como isso é feito: shre.ink/tensao). Em seguida, realize a medição da corrente de excitação (I_E):

I_{M3} = _____ A, U_{M3} = _____ V, I_E = _____ mA.

VIII. Calcule a potência absorvida pela armadura do motor:

$P_{M3} = U_{M3} \cdot I_{M3}$ = _____ W. Portanto,

$P_{GFe} = P_{M3} - P_{M2}$ = _____ W. P_{Gfe} representa as perdas no ferro do alternador.

IX. Calcule as perdas do alternador (P_G):

$P_G = P_{Gm} + P_{GFe}$ = _____ W.

X. Preencha a Tabela 2. Em seguida, plote o gráfico em papel milimetrado.

Tabela 2: Medição da tensão terminal para diferentes correntes de excitação

Velocidade: 3600 rpm			
I_E (mA)	V_T (V)	I_E (mA)	V_T (V)
100		350	
150		400	
200		450	
250		500	
300			

Sugestão

- Utilize o eixo y para a tensão terminal, em Volt, e o eixo x para a corrente de excitação, em Ampère.
- Divida o valor máximo correspondente à grandeza medida pela quantidade de quadrados maiores para obter um valor adequado de Volt/Divisão.
- Observe os pontos em que há linearidade no gráfico e faça uma extrapolação por meio de uma reta tracejada! Ela corresponderá à linha de entreferro.

5. ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO

Neste experimento os objetivos são: determinar as perdas ôhmicas alternador; obter a curva de curto-circuito para a velocidade nominal e calcular a reatância sincrônica.

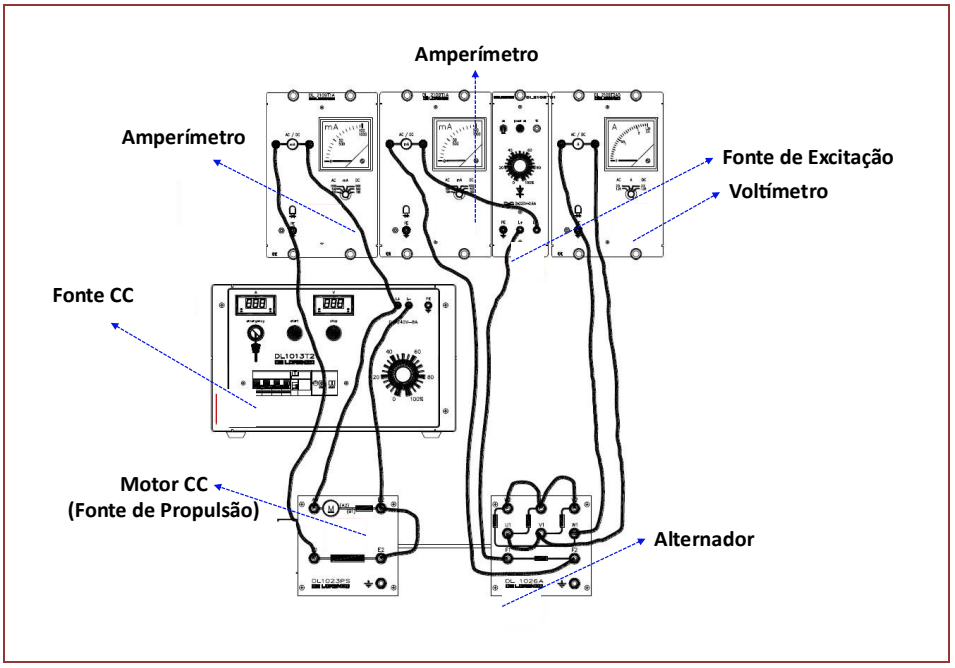
No ensaio de curto-circuito o gerador é colocado para girar na velocidade síncrona e seus terminais são curtos-circuitados. Como a tensão aplicada é muito pequena, o fluxo magnético é pequeno e, portanto, o núcleo da máquina não entra em saturação. Assim, obtém-se uma relação entre a corrente de campo e a corrente de armadura linear (Chapman, 2013).

5.1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nota: Procedimento adaptado do manual técnico De Lorenzo – GTU101.1.

i. Monte o ensaio conforme o diagrama apresentado na Figura 7.

Figura 7: esquemático aplicado no ensaio de curto-circuito



Fonte: Adaptado de De Lorenzo.

ii. Ajuste a tensão CC até que a velocidade nominal do alternador seja alcançada. Em seguida, excite o campo do alternador de forma a gerar a corrente nominal.

iii. Quando o alternador estiver aquecido, meça a temperatura do estator:

$$T = __ °C.$$

iv. Realize a medição de I_E, I_M e U_M:

$$I_{E2} = ____ A, \qquad I_{M4} = ____ A, \qquad U_{M4} = ____ V.$$

v. Calcule a potência absorvida pela armadura do motor (P_{M4}):

$$P_{M4} = U_{M4} \cdot I_{M4} = ____ W.$$

vi. Calcule a potência absorvida pelo alternador (P_{M5}):

$$P_{M5} = P_{M4} - P_{M1} = ____ W.$$

vii. A diferença, portanto, representa as perdas no cobre do alternador (P_{Cu}):

$$P_{Cu} = P_{M5} - P_{Gm} = ____ W,$$

viii. Calcule as perdas ôhmicas à temperatura ambiente:

$$P_{SCu} = 3\, R_s \cdot I_N^2 = ____ W.$$

ix. Calcule as perdas por dispersão:

$$P_{ad} = P_{Cu} - P_{SCu} = ____ W.$$

x. Calcule a resistência equivalente pertinente:

$$R_{ad} = \frac{P_{ad}}{I_N^2} = ____ \Omega.$$

xi. Calcule as perdas no cobre à 75 °C:

$$R_{75} = 3\, R_{S75} + R_{ad},$$

$$P_{Cu75} = R_{75} \cdot I_N^2 = ____ \text{ W}.$$

xii. Preencha a Tabela 3. Em seguida, plote o gráfico em papel milimetrado.

Tabela 3: Medição da corrente de curto-circuito para diferentes correntes de excitação

Velocidade: 3600 rpm			
I_E (mA)	I_S (A)	I_E (mA)	I_s (A)
200		400	
250		450	
300		500	
350			

Sugestão
- Trace a curva de curto-circuito no mesmo gráfico de circuito aberto. Utilize, portanto, o segundo eixo para representar a corrente de armadura.

5.2. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. Calcule a eficiência do gerador.

5.3. PROBLEMA RESOLVIDO

Uma máquina síncrona trifásica de polos lisos, 15 kVA, 220 Volt (Y), 60 Hz, ~~F.P.~~ fator de potência 0,80 atrasado, foi submetida aos ensaios de Circuito Aberto, Curto-Circuito e CC. Os resultados desses ensaios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Dados de tensão de circuito aberto e curto-circuito

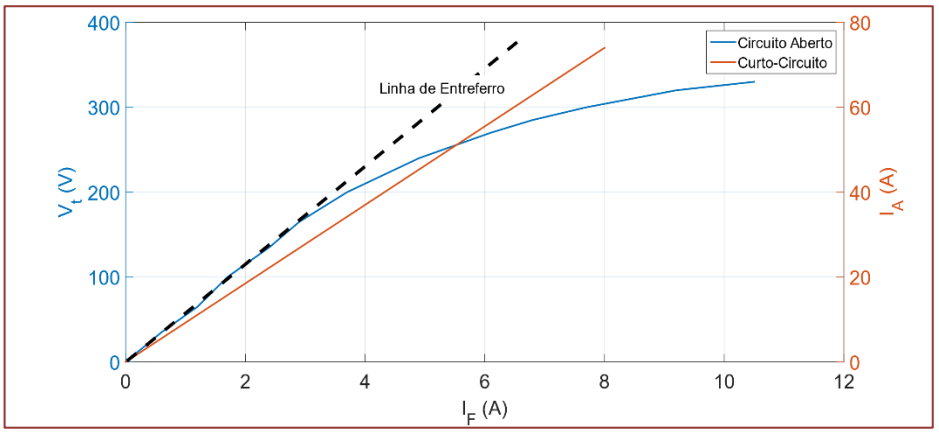
I_E (A)	0,6	1,2	1,7	2,4	2,9	3,7	4,0	4,3	4,6	4,9	5,5	6,1	6,8	7,7	9,2	10,5
V_T (V)	35	65	100	135	165	00	10	220	230	240	255	270	285	300	320	330
R_A (Ω/Fase)			0,29					I_E (A) = 8,0/ I_A (A) = 74								

A partir dos dados fornecidos:

1. Apresente as características correspondentes aos ensaios;
2. Determine as reatâncias síncronas por fase, correspondentes aos estados não-saturado e saturado (aproximação) da máquina, em ohm/fase e em pu.

Solução da Questão 1: As características de curto-circuito e circuito aberto podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8: gráfico dos ensaios de circuito aberto e curto-circuito



Fonte: Autoria própria.

Solução da Questão 2:

$$X_{S-NSat} = \sqrt{{Z_S}^2 - {R_A}^2} \rightarrow X_{S-NSat} = \sqrt{\left(\frac{\frac{100}{\sqrt{3}}}{15{,}7}\right)^2 - 0{,}29^2}, \quad (7)$$

$$X_{S-NSat} = 3{,}68\ \Omega/Fase, \quad (8)$$

$$Z_{base} = \frac{127^2}{5000} \rightarrow Z_{base} = 3{,}23\ \Omega/Fase, \quad (9)$$

$$\boldsymbol{X_{S-NSat} = 1.14\ pu.} \quad (10)$$

$$X_{Sat} = \sqrt{\left(\frac{\frac{220}{\sqrt{3}}}{39{,}77}\right)^2 - 0{,}29^2} = X_{S-Sat} = 3{,}2\ \Omega/Fase, \quad (11)$$

$$\boxed{\boldsymbol{X_{S-Sat} = 0.88\ pu}}. \quad (12)$$

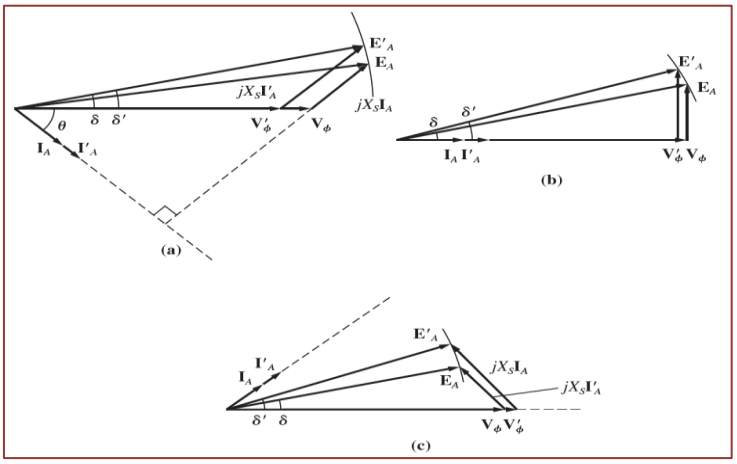
6. GERADOR SÍNCRONO EM OPERAÇÃO ISOLADA

Neste experimento o objetivo é analisar a dinâmica de um gerador síncrono em operação isolada com a inserção de cargas com potências ativa, reativa indutiva e reativa capacitiva.

Quando um gerador síncrono opera de forma isolada ele é o único responsável por fornecer tensão à carga que está conectada em seus terminais. De acordo com Chapman (2013), nesse modo de operação o controle da tensão de saída depende diretamente da corrente de excitação, enquanto a frequência é determinada pela velocidade de rotação, que deve ser mantida constante.

Por isso, o ajuste da corrente de campo é fundamental para manter a tensão terminal dentro dos limites adequados. Na Figura 9, é possível observar o que acontece com as tensões de armadura e terminal mediante o aumento de carga com diferentes fatores de potência.

Figura 9: Efeito do aumento de carga: (a) indutiva (b) resistiva (c) capacitiva



Fonte: Retirado de Chapman (2013).

Nota-se, portanto, que ao aumentar a carga:

- Se ela for indutiva, a tensão terminal tende a diminuir;
- Se ela for capacitiva, a tensão terminal tende aumentar;
- Se ela for resistiva, a tensão terminal tende a diminuir ligeiramente.

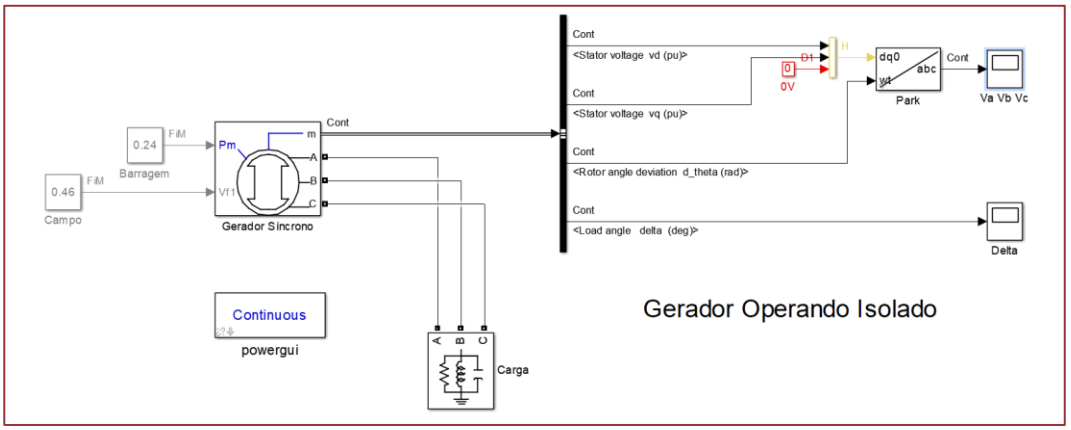
6.1. *SOFTWARES* UTILIZADOS

Para realizar a simulação são necessários os ~~s~~*Softwares* Matlab/~~s~~Simulink®.

6.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Abra o Matlab e, em seguida, o Simulink.
2. Em *Simulation*, utilize a seguinte configuração:
   a. *Start time* 1, *Stop time* 3, *Solver type* Variable-step;
   b. *Solver* ode23t (mod. stiff/Trapezoidal), *Max step size* 200e-6.
3. Utilize a máquina modelo Standard, em pu:
   a. Modelo 14: 460 V, 1800 rpm, 60 Hz;
   b. A carga deve ser compatível com o gerador;
   c. Coloque os blocos conforme apresentado na Figura 10.

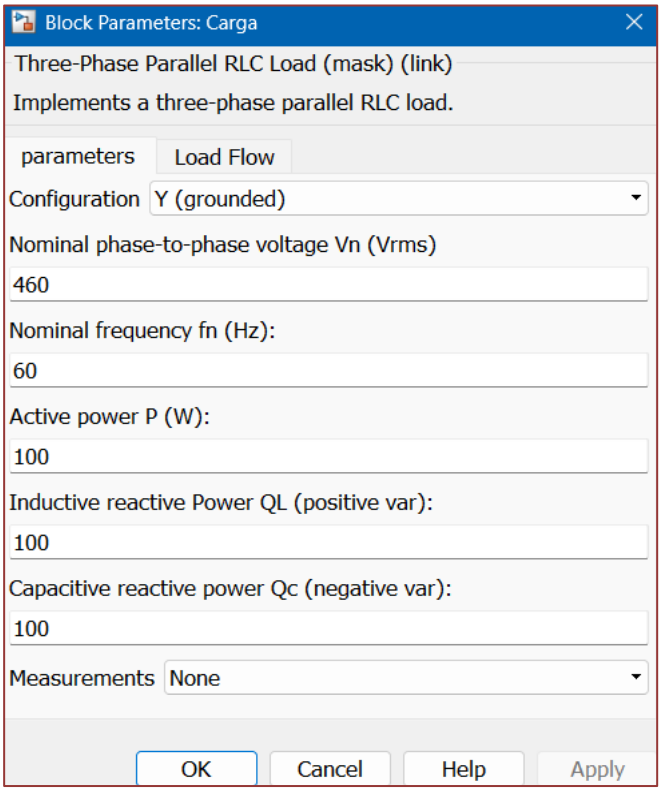
Figura 10: Diagrama elétrico



Fonte: Autoria própria.

4. Insira uma carga inferior à potência do gerador, conforme a Figura 11.

Figura 11: Carga inicial



Fonte: Autoria própria.

5. Ajuste os parâmetros de entrada até obter a tensão de 1 pu/60 Hz.
6. Aumente a potência ativa da carga para 10 kW.
7. Ajuste os parâmetros de entrada até obter tensão de 1 pu/60 Hz.

8. Diminua a potência ativa da carga.
9. Ajuste os parâmetros para a Operação Inicial.
10. Coloque uma carga predominantemente indutiva com potência de 10 kvar.
11. Ajuste a tensão de excitação até obter 1 pu na saída.
12. Ajuste novamente os parâmetros para a Operação Inicial.
13. Coloque uma carga predominantemente capacitiva com potência de 10 kvar.
14. Ajuste a tensão de excitação até obter 1 pu na saída.

6.3. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. Faça uma análise considerando o ângulo de carga (δ), em graus, as tensões de fase *Va*, *Vb* e *Vc*, em pu, e a frequência elétrica, em Hz. Utilize o livro texto da disciplina para embasar suas conclusões.

7. GERADOR SÍNCRONO EM PARALELO

Neste experimento o objetivo é analisar a dinâmica de um gerador síncrono em operação paralela para diferentes parâmetros de entrada.

Quando um gerador síncrono opera conectado à rede, a tensão e a frequência elétrica são impostas pelo SIN, tendo em vista os inúmeros geradores em paralelo. Dessa forma, esse novo gerador opera obrigatoriamente em sincronia, entretanto, há a possibilidade de controlar as potências ativa e reativa fornecidas ao SIN (Chapman, 2013).

Nesse tipo de operação, o gerador pode apresentar duas dinâmicas, as quais dependem da excitação: superexcitado, quando passa a ser visto como um capacitor pelo SIN e subexcitado, quando é visto como um indutor pelo SIN. Já a potência ativa, pode ser controlada pela potência de entrada.

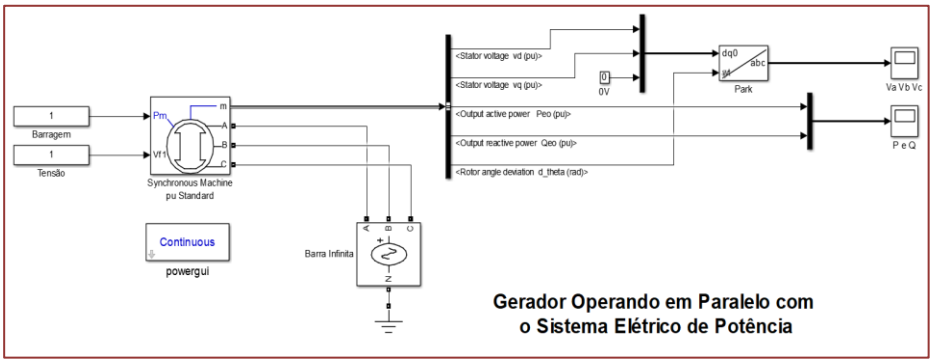
7.1. *SOFTWARES* UTILIZADOS

Para realizar a simulação são necessários os *Softwares* Matlab/sSimulink®.

7.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Abra o Matlab e, em seguida, o Simulink.
2. Em *Simulation*, utilize a seguinte configuração:
   a. *Start time:* 1, *stop time:* 3, *max step size:* 200e-6
3. Utilize a máquina modelo Standard, em pu
   a. Modelo 14: 460 V, 1800 rpm, 60 Hz.
   b. Coloque os blocos conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12: Diagrama do Gerador Síncrono em Paralelo com o SEP



Fonte: Autoria própria.

7.3. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. Ajuste os parâmetros de entrada e observe o efeito na tensão, frequência e nas potências ativa e reativa considerando diferentes cenários. Faça um comparativo com o experimento anterior.

8. MOTORES DE INDUÇÃO

Neste experimento os objetivos são analisar a operação de diferentes motores de indução e projetar uma chave magnética estrela triângulo.

Nos motores assíncronos o torque desenvolvido é fortemente dependente do escorregamento entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor. Eles apresentam fator de potência baixo, dado o seu circuito predominantemente indutivo e, uma corrente elevada na partida, a qual tende a diminuir conforme o motor atinge a velocidade nominal (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2014).

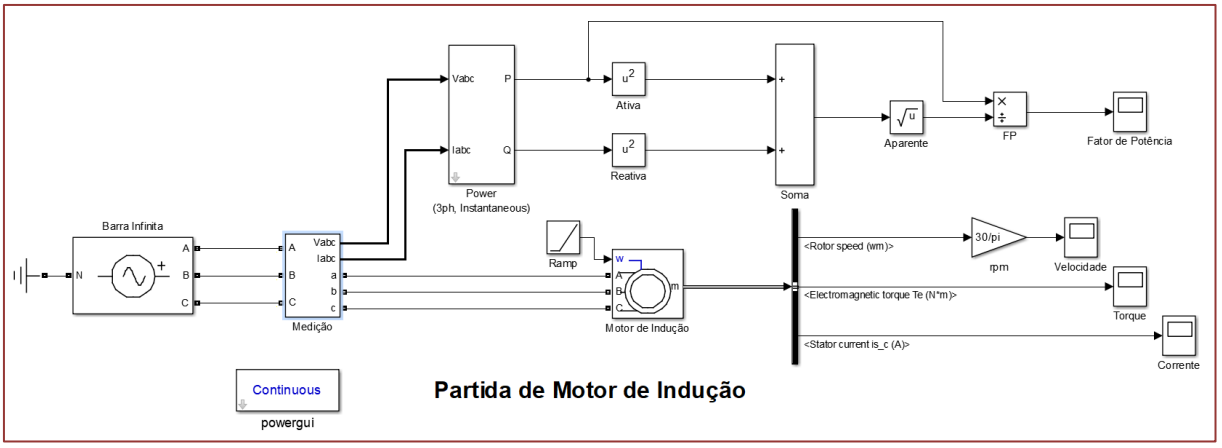
8.1. *SOFTWARES* UTILIZADOS

São necessários os *Softwares* Matlab/simulink® e CADeSimu®.

8.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Abra o Matlab e, em seguida, o Simulink.
2. Em *Simulation*, utilize a seguinte configuração:
   a. *Start time:* 0, *stop time:* 2, *max step size:* auto
3. Coloque os blocos conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13: Diagrama do Motor Gaiola de Esquilo



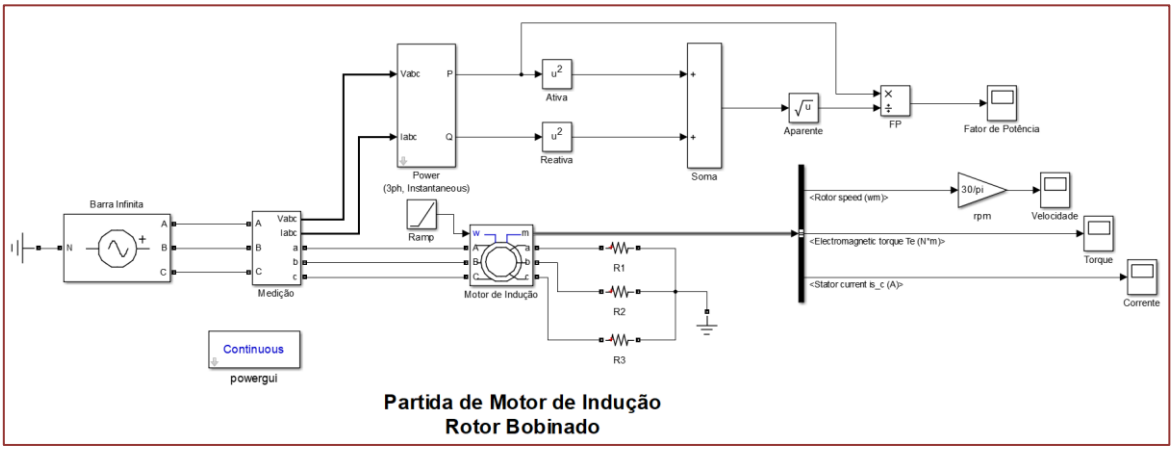
Fonte: Autoria própria.

4. Na máquina, modelo *Asynchronous Machine SI*, configure da seguinte forma:

Parâmetros Elétricos	Parâmetros Nominais – Rotor Gaiola de Esquilo	
R_1 = 2,124 Ω	$P_{mecânica}$ = 1,5 hp	$\tau_{Máximo}$ = 380%
L_1 = 0,0065 H	$I_{Nominal}$ = 4,52/2,62 A	I_p/I_n = 8,8
L_M = 0,105 H	$V_{Nominal}$ = 220/380 V	s = 2,22%
R_2 = 0,722 Ω	$\tau_{Nominal}$ = 5,97 N.m	$\tau_{Partida}$ = 310%
L_2 = 0,0065 H	η = 87,5%	FP = 0,73
Polos = 4	*Frequência* = 60 Hz	$\omega_{Nominal}$ = 1760 rpm

5. Forneça os gráficos: torque vs velocidade, fator de potência vs torque e corrente vs velocidade. Para isso salve os dados e plot no Matlab.
6. Altere a tensão da fonte de 60% para 100% e observe a corrente.
7. Altere a simulação para Rotor Bobinado, conforme mostrado no diagrama da Figura 14, insira resistências de $R = R_1$, $R = 2R_1$, $R = 3R_1$ e forneça a curva de torque vs velocidade para cada um desses casos.

Figura 14: Diagrama do Motor com Rotor Bobinado



Fonte: Autoria própria.

8.3. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. Projete um quadro industrial para o acionamento do motor apresentado na Figura 15:
    a. Partida estrela triângulo;
    b. Proteção contra curto-circuito e sobrecorrente;
    c. Não deve ser possível reverter o sentido de giro em carga;
    d. Luz de sinalização para indicar que o motor está ligado;
    e. Botão para desligamento de emergência;
2. Verifique a corrente durante a partida e compare com a partida direta.

Figura 15: Dados de placa do motor

Fonte: Autoria própria.

9. MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA

Neste experimento os objetivos são: analisar a operação de máquinas CC como gerador e como motor; controlar e descrever o funcionamento de um motor CC.

As máquinas CC são dispositivos eletromecânicos que se destacam pelo fácil controle de velocidade e do torque, o que pode ser realizado pela variação da tensão de armadura, controle do campo ou resistência de armadura. Na operação como motor, por exemplo, o torque é proporcional ao produto entre a corrente de armadura e o fluxo magnético. Isso permite um controle direto do torque por meio da corrente. Há também a possibilidade de operar com velocidade e torque constantes, o que torna essas máquinas adequadas a aplicações com elevação de carga (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2014).

Um ponto importante a ser mencionado é que as escovas e o comutador, responsáveis pelo funcionamento dessas máquinas, exigem manutenção periódica. Entretanto, é justamente a sua alta resposta dinâmica e o controle direto de velocidade e torque que as mantêm relevantes e insubstituíveis em diversas aplicações especializadas.

9.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

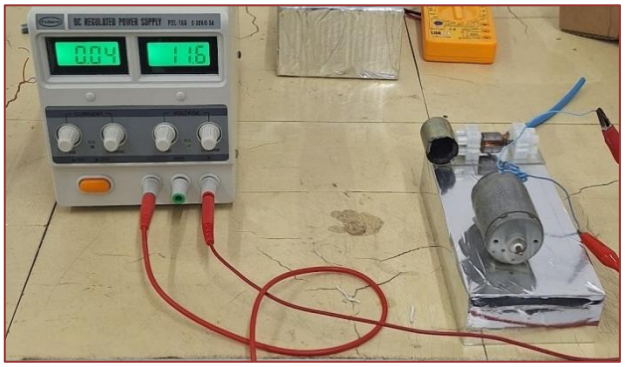
Para este experimento são necessários: uma fonte CC ajustável, um multímetro, dois motores CC de 12 V e um LED.

9.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Operação como Motor

1. Conecte a fonte CC ao motor (atenção à polaridade).
2. Varie a tensão de 0 a 12 V e verifique a velocidade correspondente.
3. Para uma mesma carga no eixo e, diminua a tensão e observe a corrente.

Figura 16: Operação como motor



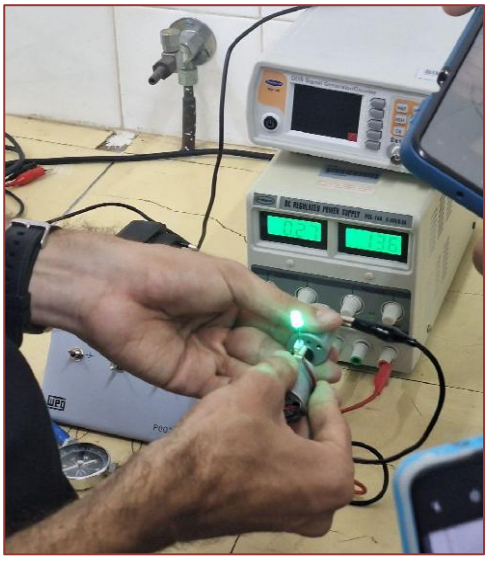
Fonte: Autoria própria.

Operação como Gerador

1. Acople o eixo do motor 1 (motor) ao eixo do motor 2 (gerador).
2. Alimente o motor 1 e observe o LED conectado ao motor 2.

3. Meça a tensão gerada no motor 2 com o multímetro.
4. Mude a tensão aplicada ao motor 1 e observe o efeito sobre a tensão gerada.

Figura 17: Operação como gerador



Fonte: Autoria própria.

9.3. PROBLEMAS SUGERIDOS

1. A corrente elétrica é proporcional a tensão do motor CC? O que acontece quando a tensão é diminuída e a carga na saída continua a mesma.

10. ENSAIOS COM MOTORES MONOFÁSICOS

Neste experimento o objetivo é realizar os ensaios rotor bloqueado, a vazio, CC e com variação de carga.

O funcionamento dos motores monofásicos é um pouco mais complexo, se comparado a um MIT. Neste caso, ao energizar o motor, há um movimento de dois campos, um progressivo e um regressivo, o qual é descrito pela teoria do duplo campo girante (Chapman, 2013). A dinâmica desses campos, inicialmente, não é suficiente para girar o rotor, portanto, é necessário fazer uso de algum artifício de partida.

A adição desses artifícios formaliza diferentes modelos, os principais são: o motor de indução com capacitor de partida, em que há um enrolamento principal, projetado para a operação contínua do motor, um enrolamento auxiliar, feito com fio mais fino, em série com um capacitor eletrolítico e uma chave centrífuga, conforme a Figura 18 (b). O segundo modelo utiliza um capacitor permanente e dois enrolamentos, portanto, ele funciona de forma análoga a um motor bifásico.

Para conhecer a eficiência desses motores, há a necessidade de realizar alguns ensaios típicos já discutidos anteriormente: ensaio de rotor bloqueado, o ensaio a vazio e o ensaio CC. O procedimento é similar ao adotado em um MIT, contudo, a etapa experimental deve considerar as particularidades do modelo do motor, conforme está descrito na NBR

17094-4/2016.

No ensaio em vazio, por exemplo, o procedimento é análogo para os dois modelos: utiliza-se um variac para diminuir gradativamente a tensão aplicada e a velocidade. No ensaio de rotor bloqueado, entretanto, deve-se considerar as particularidades do motor, portanto, para o motor com capacitor de partida, o enrolamento auxiliar deve ser seccionado, tendo em vista o funcionamento do motor em plena carga. Já para o segundo modelo, deve-se utilizar um freio mecânico. Nesse ensaio a tensão aplicada deve ser reduzida para garantir que a corrente seja igual a nominal, evitando a queima do enrolamento (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2014).

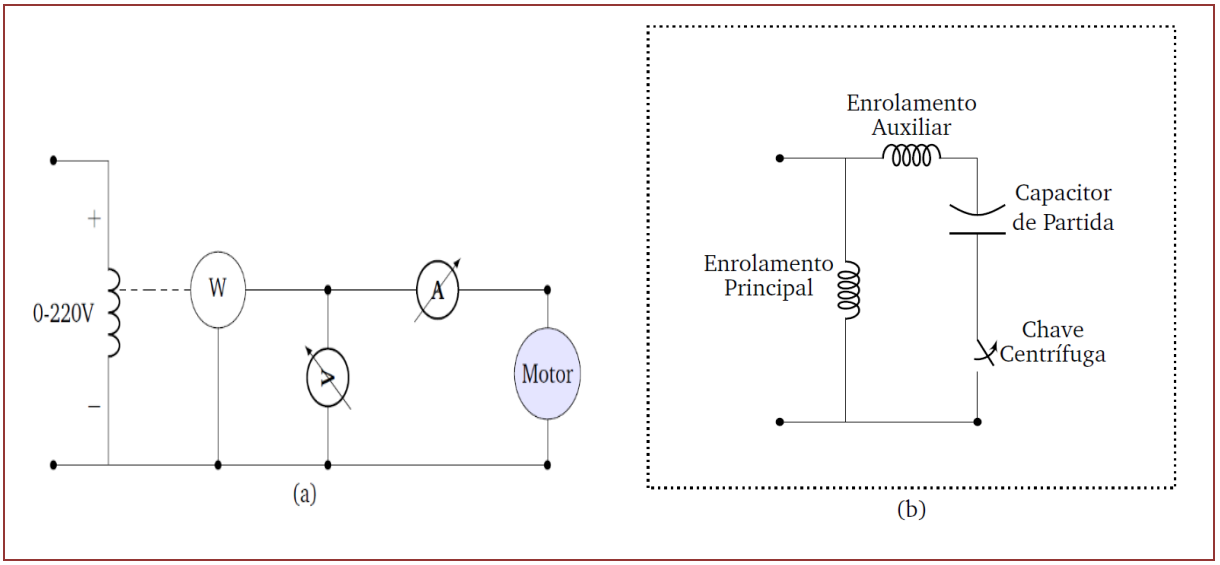
10.1. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

São necessários um motor monofásico com capacitor de partida, um alicate amperímetro, um freio mecânico, um variac e um wattímetro.

10.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

i. Monte o circuito da Figura 18 (a).

Figura 18: Diagrama elétrico: (a) ligação externa. (b) ligação interna



Fonte: Autoria própria.

ii. Ensaio a Vazio

1. Garanta que não há carga no eixo;
2. Alimente o motor com tensão nominal;
3. Diminua a tensão gradativamente, registrando tensão, corrente e potência ativa;
4. Desenhe as curvas de tensão vs corrente, potência e velocidade;
5. A potência consumida na velocidade nominal representa uma estimativa das perdas rotacionais.

iii. Ensaio de Rotor Bloqueado

1. Seccione o enrolamento auxiliar;
2. Aumente a tensão gradativamente até atingir a corrente nominal;
3. Realize a medição da corrente, tensão, potência ativa e da velocidade.

iv. Ensaio CC

1. Seccione o enrolamento auxiliar;
2. Conecte a fonte CC aos terminais do motor;
3. Aumente a tensão gradativamente até atingir a corrente nominal;
4. Calcule a resistência e faça a correção para a temperatura de referência;
5. Estime as perdas elétricas no estator e no rotor.

v. Comportamento do Motor com a Mudança de Carga

1. Alimente o motor com tensão nominal;
2. Freie o rotor até atingir a corrente nominal;
3. Registre potência ativa.

Apresenta-se na Figura 19 o ensaio a vazio do motor monofásico. A tensão é gradativamente aumentada a partir do variac; o alicate medidor realiza as leituras de corrente, tensão e potência. Adicionalmente, realiza-se a medição da velocidade do motor por meio do tacômetro digital.

Figura 19: Ensaio a vazio com motor de indução monofásico

Fonte: Autoria própria.

REFERÊNCIAS

[1] BOYLESTAD, R. L. **Análise de Circuitos**. 12ª ed. Pearson, 2013.

[2] CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5a ed. São Paulo: AMGH, 2013.

[3] DE LORENZO. GTU101.1 – **Manual de Experimentos de Máquinas Elétricas**. Milão: De Lorenzo S.p.A., [s.d.].

[4] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7a ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

[5] JORDÃO, R. G. **Máquinas Síncronas**. 1a ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977.

[6] SEIXAS, F. J. M. **Notas de Aula: Máquinas Elétricas II**. Universidade Estadual Paulista, 2016.

Capítulo 7

Avaliação do comportamento de Argamassas de Hidratação Controlada (AHC) contendo adição de EVA (Etileno Acetato de Vinila)

Rian Campos Almeida
Maria Eduarda do Nascimento Souto
Jhennifer Larissa de Barros Silva
Gabriel Nunes Ferreira de Araujo
Aline Figueiredo da Nóbrega

Resumo: A construção civil demanda grandes volumes de materiais e ainda enfrenta limitações no que se refere à eficiência produtiva e ao controle de qualidade em obra. Como alternativa, as argamassas de hidratação controlada (AHC) destacam-se por possibilitar maior uniformidade no processo e significativa redução de desperdícios em comparação às misturas preparadas em canteiro. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de Etileno Vinil Acetato (EVA), proveniente da indústria calçadista, em formulações de AHC contendo metacaulim, explorando seu potencial como insumo sustentável capaz de mitigar impactos ambientais, como a redução da extração de areia de leito de rio. Assim, utilizando um traço de 1:3 em volume, foram produzidas três misturas: referência, 10% EVA e 30% EVA, adotando relação a/c de 0,95 e 0,4% de aditivo estabilizador de hidratação. Avaliou-se, em dois tempos de estabilização (0h e 48h), propriedades no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão). Os resultados indicaram que o EVA reduziu a densidade e aumentou o teor de ar incorporado. Em contrapartida, as formulações com EVA apresentaram resistências superiores à referência em 0h, sobretudo para 10EVA, mas registraram perdas após 48h.

Palavras-chave: Resíduo de EVA (Etileno Vinil Acetato), estabilização, metacaulim, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais e enfrenta desafios quanto à produtividade, padronização e controle de qualidade. O uso de argamassas preparadas manualmente em canteiro, ainda predominante, mostra-se limitado pelo alto consumo de mão de obra, desperdício de materiais e tempo de preparo (Antoniazzi, 2019). Como alternativa, as argamassas de hidratação controlada (AHC), produzidas em centrais industriais e entregues prontas para uso, eliminam o preparo manual, organizam as etapas construtivas e possibilitam maior controle tecnológico, reduzindo desperdícios e aumentando a produtividade.

Nos últimos anos, o desenvolvimento normativo e científico das argamassas de hidratação controlada avançou com a criação da CT 204 pelo IBRACON e a revisão da NBR 13281:2023 pela ABNT, que estabeleceu maior padronização e respaldo técnico, reforçando a confiabilidade de seu uso em obras de médio e grande porte. As AHC são compostas por cimento, agregado miúdo e aditivos como estabilizadores de hidratação (AEH) e incorporadores de ar (AIA), utilizados para prolongar o tempo de utilização da mistura, que pode variar de 24 a 72 horas (Carasek, 2010; Bauer et al., 2015). O mecanismo de estabilização consiste em retardar a reação de hidratação do cimento sem comprometer a trabalhabilidade da argamassa, mantendo-a utilizável até o momento da aplicação (Matos, 2013).

Paralelamente à esses avanços, observa-se um crescente interesse no aproveitamento de resíduos industriais como estratégia tanto para melhorar o desempenho das argamassas quanto para fomentar práticas mais sustentáveis na construção civil. Nesse sentido, estudos voltadas a argamassas e concretos convencionais já evidenciaram a viabilidade da incorporação de diferentes resíduos, como *o Etileno Vinil Acetato (EVA)*, proveniente da indústria calçadista, além de resíduos cerâmicos e pó de borracha de pneus (Andrade e Medeiros, 2012). O EVA, em particular, destaca-se pelo potencial de reduzir a massa específica e contribuir para o isolamento acústico das argamassas, no entanto, a adição do resíduo pode reduzir a resistência mecânica da argamassa. (Andrade e Medeiros, 2012).

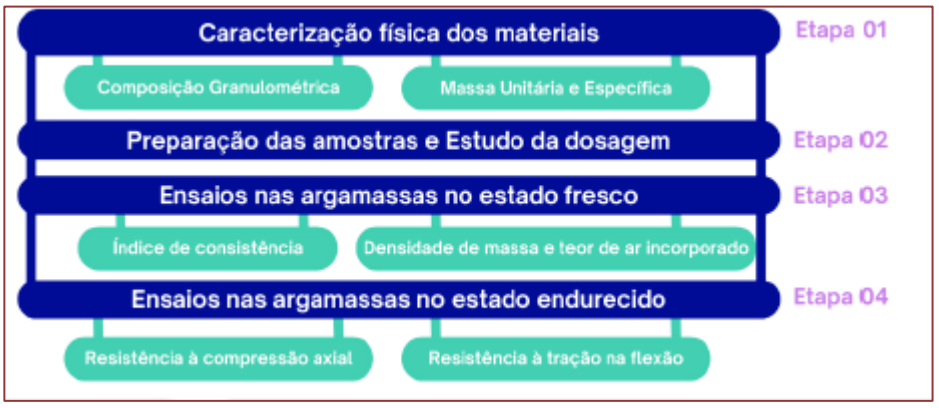
Para minimizar esse efeito, a incorporação de adições pozolânicas, como o metacaulim, tem se mostrado eficiente por melhorar o desempenho mecânico, aumentar a durabilidade da matriz cimentícia, reduzir a porosidade e reforçar a resistência a agentes agressivos (Paulino, 2020; Mota et al., 2016). Destaca-se ainda que a indústria calçadista, uma das maiores do país, gera grande volume de resíduos descartados inadequadamente (Abicalçados, 2022). A substituição parcial da areia por esse resíduo contribui para a preservação de um recurso natural escasso (UNEP, 2022) e para a redução da pegada de carbono.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades das argamassas de hidratação controlada produzidas com a incorporação de metacaulim e com a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de EVA. Nesse contexto, busca-se analisar como diferentes teores de EVA influenciam o desempenho da argamassa, avaliar o comportamento das formulações no estado fresco e endurecido e enquadrar os resultados obtidos segundo os critérios estabelecidos pela Nbr 13281:2023.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta o cronograma experimental da pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma experimental da pesquisa



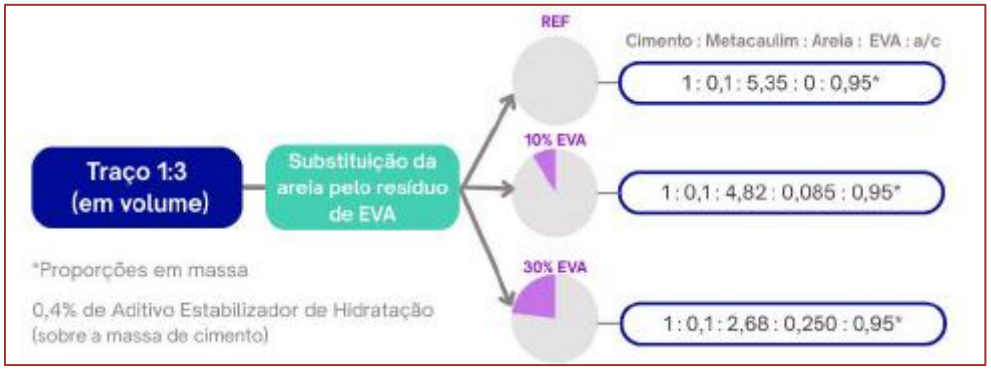
Fonte: O Autor (2025).

No desenvolvimento da pesquisa, foram empregados os seguintes materiais: Cimento Portland CP V-ARI, areia natural lavada (AN), água, resíduo calçadista do tipo EVA, metacaulim comercial (MC) e aditivo estabilizador de hidratação (AEH).

A caracterização física desses insumos, utilizados na produção das argamassas, foi conduzida por meio de ensaios de massa unitária, seguindo os procedimentos da NBR 16972:2021, e de massa específica, conforme a Nbr 16605:2017.

A etapa de preparo das misturas de argamassa contou com uma mistura de referência (0% EVA) e outras duas amostras com proporções de 10% e 30% em volume da areia pelo resíduo de EVA. A Figura 2 apresenta o fluxograma com as misturas citadas, incluindo proporção, em massa, utilizado em cada uma delas, bem como a porcentagem de aditivo.

Figura 2 –Fluxograma das misturas avaliadas



Fonte: O Autor (2025).

O procedimento de mistura das argamassas foi realizado conforme as diretrizes da NBR 16541:2016. Após o amassamento, as argamassas foram submetidas a dois tempos de estabilização: 0h e 48h. Para as misturas de 0h, foram moldados seis corpos de prova em recipientes prismáticos com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, conforme a norma NBR 13279:2005. Já as misturas de 48h foram armazenadas em recipientes de PVC, com uma lâmina d'água de 3 cm, em local protegido do sol e do vento. Após o tempo de estabilização correspondente, as amostras foram moldadas e, posteriormente, desmoldadas após o endurecimento. Em seguida, seguiu para uma cura úmida até os 28 dias de idade antes de serem avaliadas no estado endurecido.

No estado fresco, foram realizados os ensaios de índice de consistência (Nbr 13276:2016), densidade massa fresca e teor de ar incorporado (Nbr 13278:2005). Já para o estado endurecido avaliou-se a resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão (Nbr 13279:2005).

Além disso, no que se refere aos ensaios mecânicos, foram utilizados três corpos de prova para cada mistura, os quais foram rompidos em uma prensa hidráulica da marca Shimadzu Servopulser, modelo EHF-EM100K1-020-0A, com capacidade máxima de 100 kN e velocidade de carregamento de 50 N/s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Quanto à caracterização física dos materiais, a Tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1 – Características físicas dos materiais

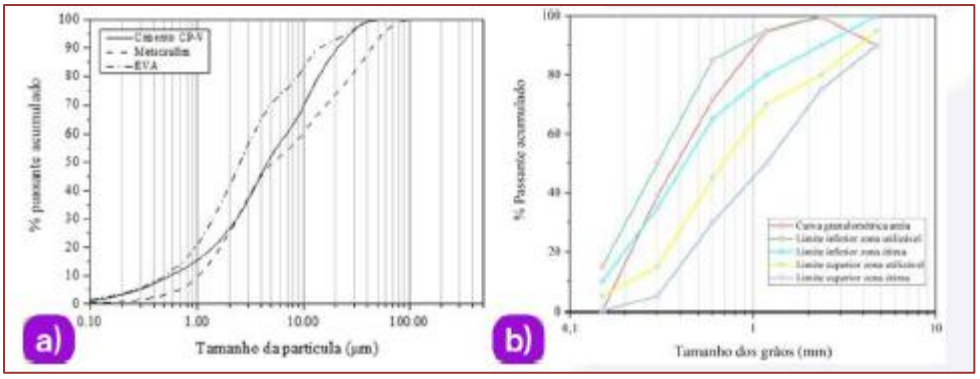
	AN	CP-V	Metacaulim	EVA	AEH
Massa Unitária	1,670	0,936	0,491	0,264	-
Massa Específica	2,62	3,10	2,59	1,25	1,140*

*Valor fornecido pelo fabricante do aditivo.

Fonte: O Autor (2025).

As curvas granulométricas do Mc e Eva foram obtidas pelo método de difração de raios laser via seco, através de um granulômetro CILAS 1090 e estão apresentadas na Figura 3 (a) além da composição granulométrica do CP-V e da areia natural, determinada conforme a Nbr 17054 (ABNT, 2022), na Figura 3 (b).

Figura 3 – a) Curva granulométrica do MC, CP-V, EVA; b) granulometria da areia



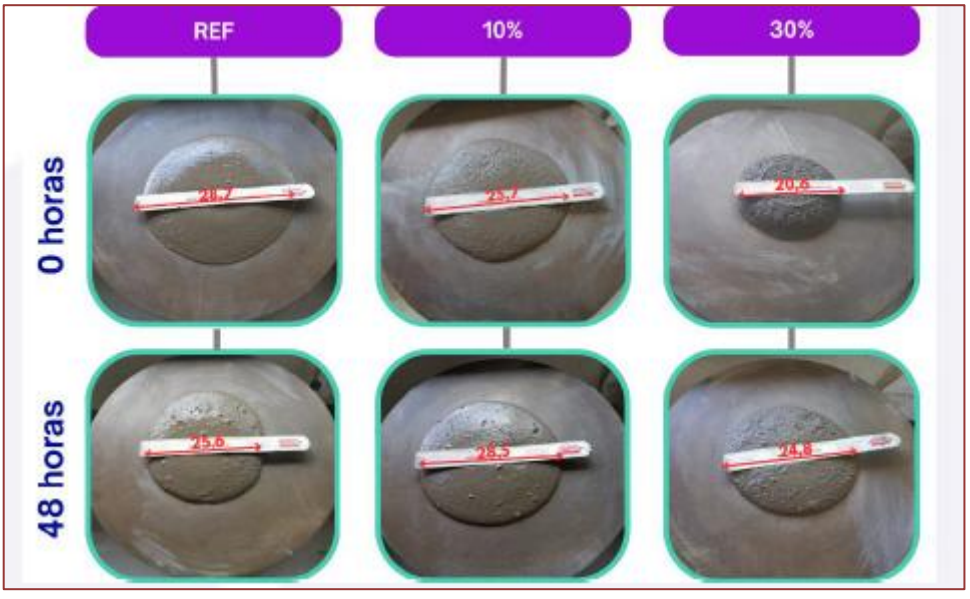
Fonte: O Autor (2025).

As análises granulométricas revelaram que o MC tem partículas maiores com dimensão em torno de 50 µm, enquanto o EVA possui dimensão máxima de 56 µm, enquanto a apresenta uma concentração significativa de grãos na faixa de 0,15 a 0,3 mm, com um diâmetro máximo de 1,2 mm e um módulo de finura de 2,56. Esses valores estão dentro dos limites da zona utilizável inferior, conforme a norma NBR 17054:2022. Na figura 3 (b), a areia utilizada apresenta um diâmetro máximo dos grãos foi de 2,40 mm e o módulo de finura de 2,0.

3.2. ESTADO FRESCO

A Figura 4 apresenta registros das amostras em análise, permitindo uma avaliação visual da argamassa.

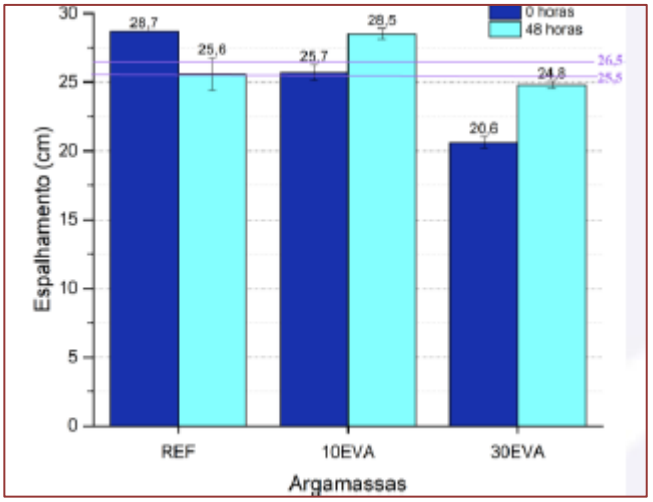
Figura 4 – Aspecto visual das amostras espalhadas



Fonte: O Autor (2025).

A consistência das argamassas foi avaliada com base no índice de consistência, adotando-se o valor de 260 ± 5 mm, conforme especificado por norma. Para cada mistura, foram realizadas três medições dos diâmetros de espalhamento, e a média dos valores obtidos foi calculada. A Figura 5 apresenta, graficamente, tais resultados.

Figura 5 – Gráfico: Espalhamento



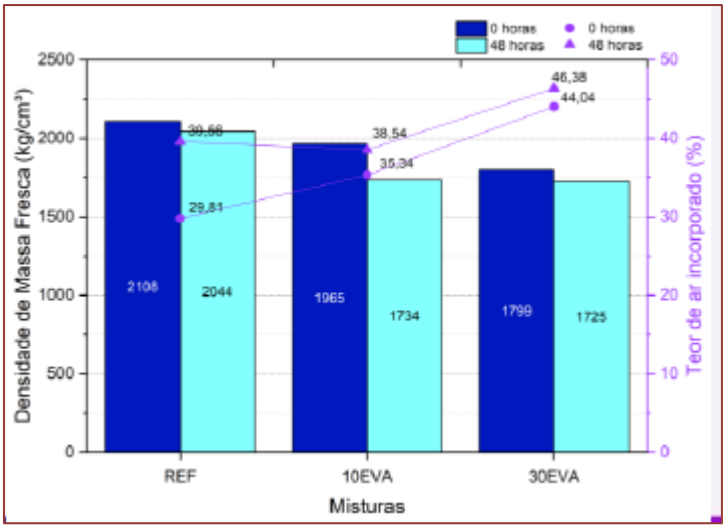
Fonte: O Autor (2025).

De acordo com os registros da Figura 4 e os resultados gráficos da Figura 5, no tempo de 0h, observa-se uma redução progressiva no espalhamento das argamassas com a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de EVA, em relação à argamassa de referência (REF). A mistura 10EVA apresentou uma redução de 10,45%, já a mistura 30EVA apresentou um decréscimo de 28,22%. Destaca-se, ainda, que apenas a mistura 10EVA manteve-se no intervalo estabelecido por norma.

Após 48h de estabilização, a mistura 10EVA apresentou um acréscimo de 11,33%, enquanto a mistura de 30EVA uma diminuição de 3,12%. No entanto, ao comparar os valores de espalhamento entre os tempos de 0h e 48h dentro de cada grupo, nota-se que 10EVA e 30EVA tiveram aumentos de 10,89% e 20,39%, respectivamente. Esse comportamento pode ser atribuído à fatores como a redistribuição da água na matriz da argamassa e a dispersão mais eficiente das partículas ao longo do tempo, conforme observado por Pinheiro et. al.(2023). Além disso, destaca-se que as argamassas, mesmo fora dos limites estabelecidos pela norma, permaneceram mais fáceis de manusear devido à adição de EVA, que melhorou a coesão entre os grãos.

Quanto a densidade de massa fresca e teor de ar incorporado, a Figura 6 apresenta os resultados obtidos.

Figura 6 – Gráfico: Densidade de massa fresca X Teor de ar incorporado



Fonte: O Autor (2025).

Na Figura 6, verifica-se que a densidade de massa fresca diminui com o aumento da substituição do agregado miúdo por resíduo de EVA, tanto no tempo de 0h quanto após 48h. Em 0h, as misturas 10EVA e 30EVA apresentaram reduções de 6,78% e 14,66%, respectivamente, em relação à REF. Após 48h, as reduções, em relação à mistura de referência, foram de 15,17% para 10EVA e 15,61% para 30EVA.

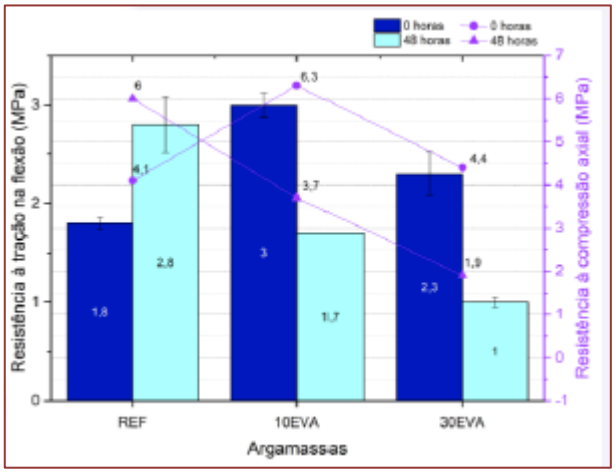
Ademais, em 0h de estabilização, verificou-se que todas as formulações contendo EVA apresentaram maiores teores de ar incorporado quando comparadas à argamassa de referência. A mistura 10EVA registrou um acréscimo de 18,55%, enquanto a 30EVA alcançou um aumento de 47,74%, evidenciando que a adição do resíduo favorece a entrada de ar na matriz da argamassa. Após 48 horas de estabilização, observou-se comportamento distinto: a composição 10EVA apresentou redução de 2,58% em relação à referência, ao passo que a formulação 30EVA manteve tendência de crescimento, com acréscimo de 17,24%.

De acordo com a Nbr 13281-2:2023, o teor máximo de ar incorporado em argamassas para assentamento deve ser de 22%. Contudo, todas as misturas analisadas ultrapassaram esse limite, o que pode limitar sua utilização em determinadas aplicações. Resultados compatíveis foram relatados por Souza (2023), reforçando essa mesma tendência observada neste estudo.

3.3. ESTADO ENDURECIDO

Quanto à análise no estado endurecido, a Figura 7 apresenta os resultados obtidos para resistência à compressão axial e à tração por flexão.

Figura 7 – Gráfico: Resistência à tração na flexão X Resistência à compressão axial



Fonte: O Autor (2025).

Analisando os resultados apresentados na Figura 7, observa-se que, no tempo de 0h, todas as misturas contendo EVA apresentaram resistências à tração na flexão maiores que a amostra de referência. Esses acréscimos foram de 66,67% e 27,78% para 10EVA e 30EVA, respectivamente. Entretanto, o inverso ocorreu para as amostras com 48h de estabilização, apresentando um decréscimo de 39,29% para 10EVA e 64,29% para 30EVA, em comparação com a amostra REF.

Adotando a classificação da Nbr 13281-1:2023 e analisando os resultados da Figura 7, observou-se que apenas a mistura 30% de EVA, no tempo de 48 horas, apresentou resistência à tração inferior ao valor mínimo exigido para a classificação R1 (1,5 MPa). Todas as demais formulações apresentaram resistência à tração superior a 1,5 MPa, enquadrando-se, portanto, em classes superiores à R1.

No que se refere à resistência à compressão axial, verificou-se que, no tempo de 0h, todas as argamassas com incorporação de EVA apresentaram desempenho superior em relação à mistura de referência. Os ganhos observados foram de 53,66% para 10EVA e 7,32% para 30EVA. Contudo, após 48 horas de estabilização, observou-se um comportamento semelhante ao observado na resistência à tração, em que as mesmas formulações apresentaram reduções de 38,33% (10EVA) e 68,33% (30EVA) quando comparadas à REF. De acordo com a Nbr 13281-2:2023, apenas a REF (48h) e a 10EVA (0h) alcançaram resistência superiores ao limite mínimo exigido para a classe AAE5 (5 MPa). Todas as demais misturas permaneceram abaixo desse patamar normativo.

Nesse sentido, os melhores resultados mecânicos ocorreram nas formulações com EVA em 0h, tanto em compressão axial quanto em tração por flexão. Já as misturas estabilizadas por 48h apresentaram perdas de resistência, podendo ser atribuídas ao excesso de água livre, cuja evaporação limitou as reações de hidratação e o desenvolvimento da microestrutura (Souza, 2023). Silva (2023) acrescenta, ainda, que agregados de menor resistência, como o EVA, reduzem a aderência à matriz cimentícia, aumentando a porosidade e comprometendo as propriedades mecânicas.

4. CONCLUSÕES

A partir da análise realizada, é possível concluir que, no estado fresco, verificou-se uma redução no espalhamento das argamassas à medida que aumentou a substituição do agregado miúdo por EVA. Além disso, observou-se que apenas a mistura 10EVA manteve-se dentro dos limites normativos no tempo inicial de 0h. Após 48h de estabilização, as duas formulações, em seus respectivos grupos, registraram aumento no espalhamento em relação ao tempo inicial. Já a densidade de massa fresca diminuiu com o aumento do teor de EVA, enquanto o teor ar incorporado aumentou, ultrapassando o limite de 22% da Nbr 13281-2:2023.

Quanto à análise no estado endurecido, todas as formulações com EVA superaram a referência em compressão e tração na flexão, com destaque para a 10EVA. Após 48h, porém, observou-se queda de resistência mecânica em ambas as misturas. Por fim, recomenda-se estudos adicionais para avaliar os efeitos desse tempo sobre a microestrutura e possíveis combinações do EVA com outros materiais pozolânicos, visando atender às normas técnicas.

REFERÊNCIAS

[1] _. **NBR 13281-1**: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.

[2] **NBR 13281-2**: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios. Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria. Rio de Janeiro, 2023.

[3] _. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

[4] _. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

[5] _. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

[6] _. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

[7] _. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

[8] _. NBR 16972: Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

[9] _. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

[10] ANDRADE, L. A. S.; MEDEIROS, R. **Reaproveitamento de rejeitos de EVA para produção de placas utilizáveis na construção civil**. Revista Científica Indexada Linkania Master, Tubarão, v. 3, n. 3, p. 1-13, jul. 2012.

[11] ANTONIAZZI, J. P. **O efeito dos aditivos incorporador de ar e estabilizador de hidratação nas propriedades das argamassas estabilizadas**. 2019. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS (ABICALÇADOS). **Relatório sensorial indústria de calçados**. Brasil, 2022. Disponível em: https://assets.abicalcados.com.br/3374/Relat%C3%B3rio-Setorial-2022.pdf. Acesso em: 5 mai. 2025.

[13] BAUER, E. et al. **Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento**. In SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 11., 2015, Porto Alegre. Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Porto Alegre, 2015.

[14] CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIAS, G. C. (ed.). Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 892-944, 2010.

[15] MATOS, P. R. D. **Estudo da utilização de argamassa estabilizada em alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

[16] MOTA, J. M. F.; OLIVEIRA, R. A.; CARNEIRO, A. M. P. **Durabilidade de argamassas com adição de metacaulim para reforço de alvenaria**. Revista Matéria, v. 21, n. 4, p. 1105-1116, 2016.

[17] PAULINO, I. M. **Propriedades de argamassa estabilizada contendo metacaulim e resíduo de tijolo cerâmico.** Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2020.

[18] PINHEIRO, R. C., AMORIM, E. C. A., SILVA, C. S. D., & COSTA E SILVA, A. J. D. (2023). **AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA ESTABILIZADA DE 36 HORAS EM DIFERENTES TEMPOS DE UTILIZAÇÃO.** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 13(1), 440–447.

[19] SILVA, I. C. **Argamassa estabilizada para assentamento contendo etileno acetato de vinila (EVA) e metacaulim.** 2023. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2023.

[20] SOUZA, L. S. M. **Propriedades de argamassas estabilizadas contendo metacaulim e EVA (etileno acetato de vinila).** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

[21] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Sand and sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis.** Geneva: GRID- Geneva, 2022.

Capítulo 8

Determinação de íons cobre (CU^{2+}) em cachaças artesanais produzidas em Minas Gerais usando dispositivos de imagem digital como sensores

Priscila Mariz Santana Alves
Lisbeth Zelayaran Melgar
Jorge David Alguiar Bellido

Resumo: No presente trabalho foi possível analisar a concentração de cobre em cachaças artesanais de Minas Gerais por meio de análise de imagem utilizando smartphone e a metodologia validada por espectrofotometria. Durante o estudo foram realizados testes para avaliar o pH, estabilidade e a concentração de cobre (II) que permite uma melhor avaliação analítica de cobre (II) em cachaça . Os resultados mostraram que o indicador PAN (1-(2-piridilazo)-2-naftol) foi efetivo para a análise de cobre (II) em solução tampão de pH 5, e se mantém estável para ser utilizado por 8 horas, sendo necessário o preparo da solução padrão de PAN antes de iniciar cada teste e descartá-lo ao final, esse corante funciona bem em uma faixa de concentração de cobre entre 1mg/L e 4 mg/L. O objetivo do estudo foi desenvolver um método de análise de íon Cobre (II) em cachaças artesanais de forma simples e prática, aplicando algoritmos de processamento de imagens para avaliar a tonalidade de cada pixel e estabelecer sua correlação com a concentração de cobre. O controle do teor de cobre é crucial para garantir a segurança e a qualidade da bebida.

Palavra chave: análise de imagem, *smartphone*, cobre, cachaça, espectrofotometria.

1. INTRODUÇÃO

Aguardentes são bebidas com alto teor alcoólico que são obtidas a partir da fermentação e destilação de matérias primas ricas em carboidratos (Gouveia C., 2016). No Brasil, o aguardente de cana, popularmente chamado de cachaça, é a bebida destilada mais consumida do país e a terceira em escala mundial (Souza, J.C., 2015). O órgão responsável por fiscalizar bebidas é o MAPA, que determina que a graduação alcoólica do aguardente deve estar entre 38° GL e 54° GL para estar dentro da legislação do país (Venturini W., 2013).

O processo de fabricação da cachaça artesanal consiste em moagem da cana de açúcar para a obtenção da garapa (caldo da cana), posteriormente esse líquido passa por filtração e decantação para retirada de impurezas presentes antes de diluí-lo, a fermentação ideal ocorre com o caldo de cana com concentração de açúcar em torno de 15° Brix (o caldo sem diluir possui teor de açúcares entre 18° e 22° Brix), após essa adequação de teor de açúcares o caldo é fermentado por leveduras, cada ciclo fermentativo dura em média 24 horas com a formação do vinho (Abílio, L., 2021).

Para atender às exigências legais de teor alcoólico, o vinho deve ser destilado para adequação desse parâmetro, no processo artesanal, essa etapa ocorre em alambiques de cobre, o que pode acarretar a contaminação da cachaça por íons cobre Cu^{2+}. O excesso de cobre pode ser tóxico e está associado a várias doenças como epilepsia e artrite reumatóide. A legislação brasileira permite um teor máximo de cobre em bebidas de 5 mg/L, essa concentração varia de acordo com a legislação de cada país, alguns não toleram mais que 2 mg/L, o que prejudica o processo de exportação da bebida (Souza, J.C., 2015).

Os métodos existentes de determinação do cobre em bebidas possuem um alto custo de equipamentos e grande quantidade de solvente, reagente e tratamento prévio das amostras (Abílio, L., 2021). O método mais utilizado é a espectrofotometria que consiste em determinar a concentração de cobre (Cu^{2+}), através da medição da absorbância de uma solução, que emite um feixe de luz em uma determinada faixa do espectro, e a quantidade de luz absorvida das amostras (absorbância) permite estabelecer uma relação entre absorbância e concentração. O aparelho possui alto custo de aquisição e manutenção, assim como dificuldade em transporte para a análise quantitativa do teor de cobre (II) em cachaças artesanais.

Portanto, esse estudo permite a utilização de dispositivos de imagem como sensores para a determinação de cobre em cachaças artesanais. Essa metodologia é baseada em capturas de imagens utilizando o padrão RGB, por meio de um software que detecta os componentes Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul (Blue) presentes na amostra desconhecida e mede a concentração determinando a absorbância e os pixels das imagens capturadas utlizando smartphone.

2. METODOLOGIA

2.1. SOLUÇÕES

2.1.1. SOLUÇÃO PAN

Devido à baixa solubilidade do PAN 1-(2-piridilazo)-2-naftol em água, inicialmente 0,0249 g dele foi dissolvido em álcool etílico e depois em água destilada em uma proporção de 50% para cada solvente, para isso, dissolveu o PAN em álcool utilizando um balão de 100 mL e depois completou o balão com água destilada até o menisco. A solução foi preparada

em uma concentração 10^{-3} mol/L e colocada em um vidro âmbar. A solução possui instabilidade, sendo necessário o preparo da solução padrão de PAN antes de iniciar cada teste e descartá-lo ao final (Santos O. R.W. et al., 2020).

2.1.2. SOLUÇÃO TAMPÃO

A solução tampão foi preparada a partir de uma massa de 17.28 gramas de acetato de sódio que a princípio foi dissolvida em 80mL de água destilada e depois em um volume de 4.17mL de ácido acético. Os cálculos foram feitos para 100mL de solução tampão que tenha uma molaridade de 2 mol/L. O pH foi ajustado para 5 devido a estabilidade do complexo Cu (II)–PAN que pode ser aumentada em soluções com pH na faixa de 4 e 5 (Oliveira, A. M., 2010).

A solução foi armazenada em um vidro âmbar e utilizada como estoque, conferindo sempre a faixa de pH antes de cada análise.

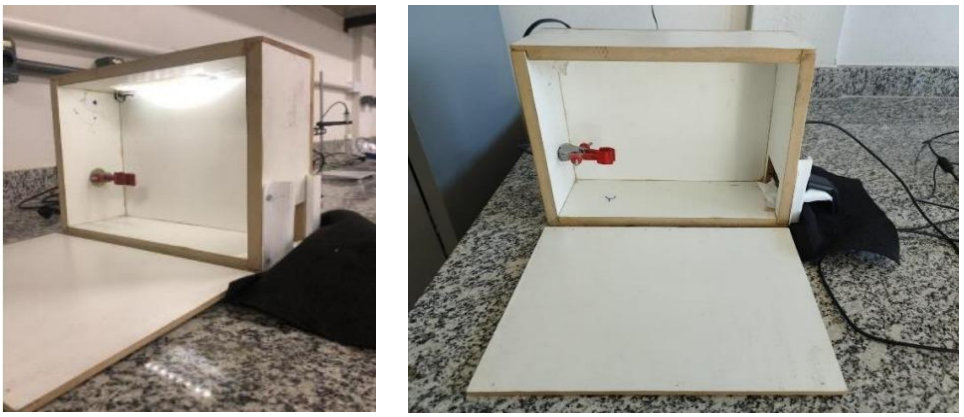
2.1.3. SOLUÇÃO COBRE

Preparou-se a solução estoque de cobre com concentração 10^{-3} mol/L. Para isso, 0.025 gramas do sulfato de cobre II ($CuSO_4.5H_2O$) foi diluído em água destilada, utilizando um balão de 100 mL. Essa solução foi armazenada em um vidro âmbar e armazenada como estoque.

2.2. OBTENÇÃO DE IMAGEM

Para a obtenção das imagens foi construído um ambiente controlado com o intuito de não haver interferências nas imagens captadas, como mostrado na Figura 1. O aparelho auxiliar é composto por uma caixa de madeira de revestimento branco acoplada de uma fita de LED tapada por uma folha de papel branco, utilizadas para evitar a incidência de luz direta na amostra e um suporte fixado na lateral que permite o apoio da amostra. A utilização desse aparelho permitiu que as fotos tivessem a mesma iluminação, posição para a obtenção das fotos de todas as amostras, fatores imprescindíveis no momento de análise.

Figura 1: Caixa para obtenção das imagens



2.3. PROGRAMAS UTILIZADOS

2.3.1. GNU OCTAVE

O processamento das imagens capturadas foi realizado utilizando o software do GNU Octave. O programa permitiu que fosse aplicada a metodologia AID (Análise Digital de Imagem), permitindo detectar o padrão RGB das amostras. As imagens foram coletadas no programa por meio de um código em um intervalo de altura e comprimento de 20X20. O programa reportou pilxels normalizados e absorbância dos dados RGB de cada amostra analisada.

2.3.2. EXCEL

Os dados RGB fornecidos pelo programa Octave são passados para uma planilha para serem usados como base de dados para a construção de um gráfico que relaciona absorbância com as concentrações de cobre (Cu^{2+}). A planilha no Excel também permitiu o cálculo dos pixels normalizados, que consiste na razão entre a média da banda RGB das amostras e a média da banda dos brancos.

2.4. CONSTRUÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO

Primeiramente foram separados 5 balões volumétricos de 100 mL numerados. Em seguida foi adicionado em cada balão 0,5 mL de PAN e 1 mL de solução tampão, variando a concentração de cobre de 1 mg/L até 4 mg/L (Tabela 1). As soluções de diferentes concentrações de cobre apresentaram diferença na coloração, quanto maior a contaminação de cobre, mais aparente foi percebida a coloração rosa, fenômeno que pode ser visualizado na Figura 2.

Tabela 1. Concentrações de cobre em soluções aquosas de etanol (40% v/v)

Balão Volumétrico (100 mL)	**PAN** (mL)	**Cobre** mg/L	**Solução Tampão** (mL)
1	0.5	1	1
2	0.5	2	1
3	0.5	3	1
4	0.5	3,5	1
5	0.5	4	1

Figura 2: Soluções aquosas de etanol 40% (v/v) contendo diferentes concentrações de Cobre(II) de 1 mg/L até 4 mg/L, solução tampão e PAN

Com concentrações de Cobre (II) acima de 5 mg/L foi observado desvio da linearidade (não seguem a lei de Beer).

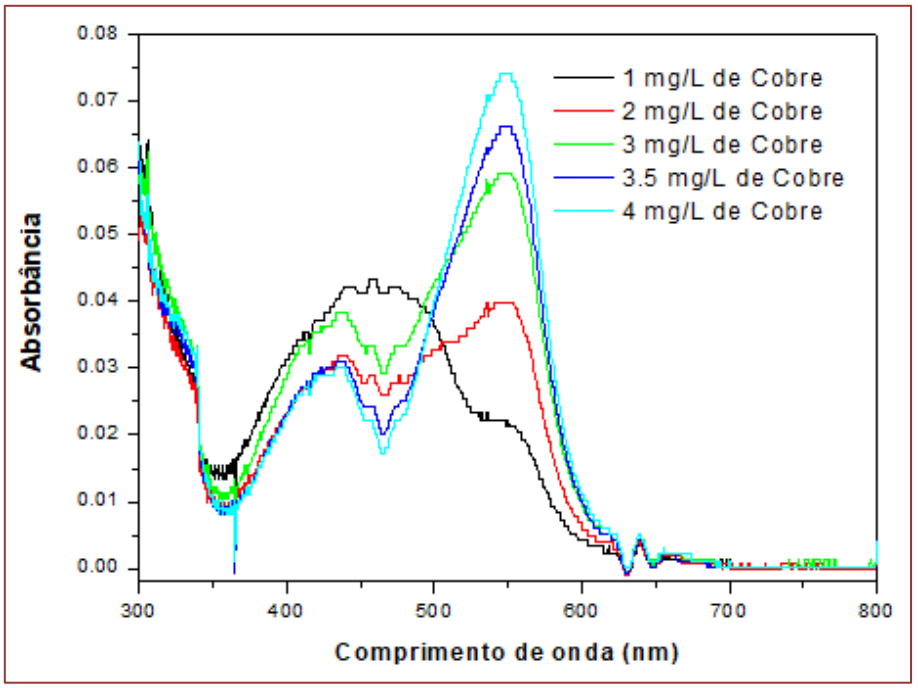
2.5. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE COBRE NA CACHAÇA

Primeiramente, em um balão volumétrico de 100 ml de cachaça foi adicionado 1 ml de solução Tampão, 0,5 mL de PAN e 200 µL de cobre com 10^{-3} mol/L de concentração, essa amostra foi levada para análise espectrofotométrica. Em seguida foi preparada uma segunda solução, similar à primeira, porém, sem a contaminação do cobre, contendo 100 ml da cachaça amostrada, 1 ml de solução Tampão e 500 µL de PAN, que também foi para análise espectrofotométrica. Para o etanol, foi preparada uma terceira solução contendo, 60 ml de água destilada, 1 ml de Solução Tampão, 500 µL de PAN, 200 µL de cobre e 40 mL de etanol (mesma proporção de álcool presente na cachaça analisada), que foi posteriormente analisada no aparelho e a uma última solução contendo 60 ml de água destilada, 1 ml de Solução Tampão, 500 µL de PAN e 40 mL de etanol que também foi levada para análise.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

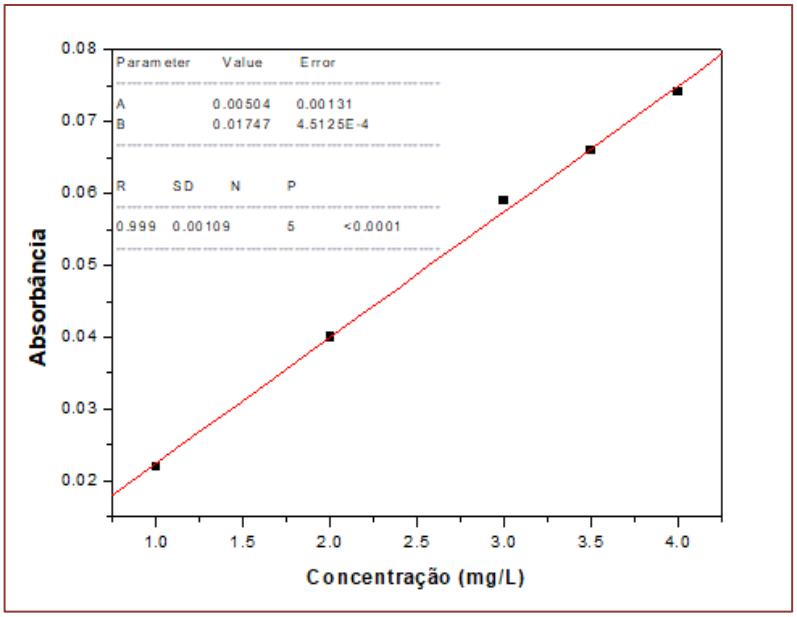
3.1. CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA A ANÁLISE QUANTITATIVA DE COBRE (II)

Figura 4: Espectros da solução de cobre em diferentes concentrações utilizando o indicador PAN em pH 5



Na Figura 4 foi obserbado uma banda no comprimento de onda de 457 nm, que corresponde a máxima absorção do corante PAN, enquanto o segundo pico, está em 550 nm de comprimento de onda, que representa a região de máxima absorção do complexo de Cu (II)-PAN. Foi contruída a curva de calibração de cobre (II), como ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Curva de calibração de cobre utilizando o indicador PAN em pH 5

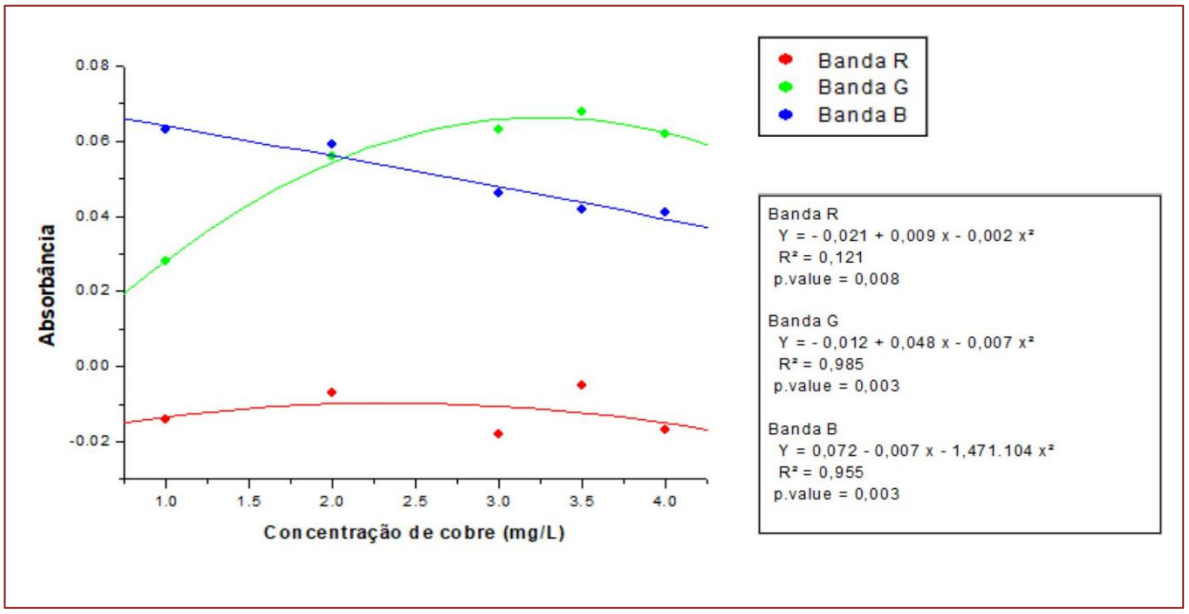


O coeficiente de determinação da curva de calibracão de cobre (II) em PAN calculada foi de R^2= 0,999.

3.1.2. ANÁLISE DA ABSORBÂNCIA

A partir das imagens obtidas no smartphone, o programa Octave calculou as absorbâncias das bandas RGB, os pixels normalizados de cobre em solução aquosa de etanol. Por meio desses dados obtidos, foi possível montar o gráfico Absorbância vs concentração de cobre como observado na Figura 7 e realizar um ajuste polinomial de 2° grau para a obtenção de uma equação que permitirá o cálculo da concentração de cobre em cachaça artesanal.

Figura 7: Absorbância das bandas RGB normalizada

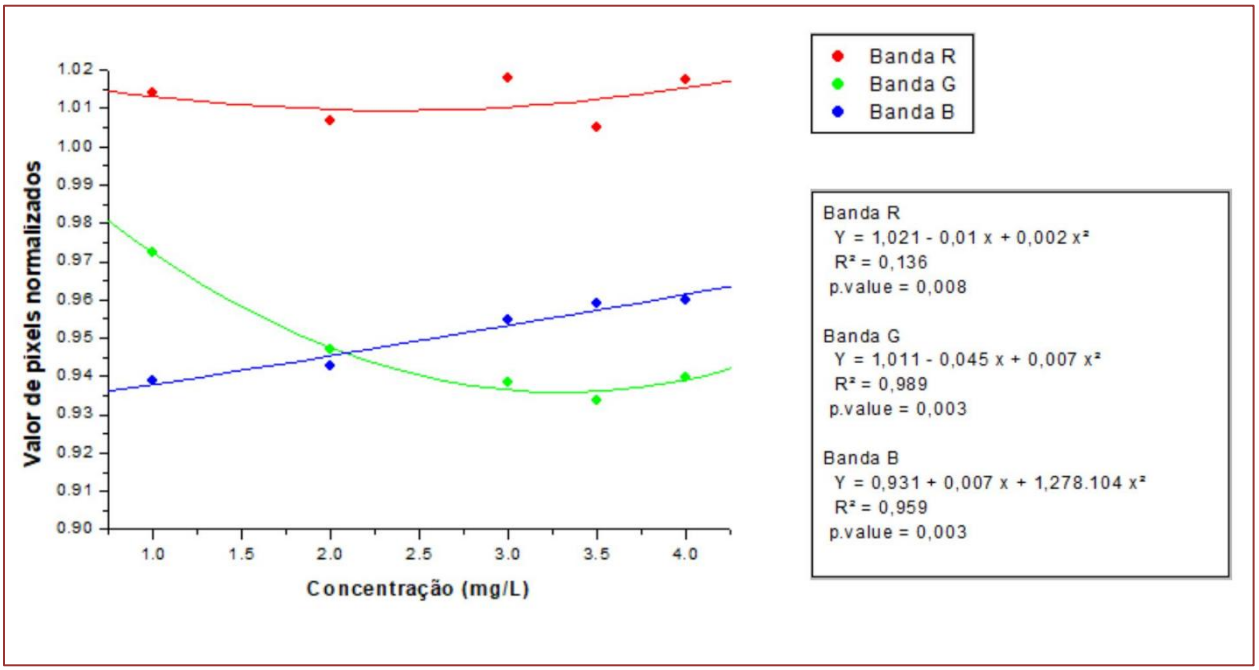


Em relação à absorbância, a Banda G demonstrou um ótimo ajuste polinomial de 2° ordem, com um coeficiente de determinação R^2 de 0,985. O coeficiente de determinação da banda R foi de 0,121 e da banda B de 0,955. Pode ser observado que a banda B também apresentou um bom ajuste polinomial, porém o resultado mais significativo foi observado na banda G. Com isso, a fórmula apresentada pelo ajuste polinomial da banda G foi utilizada para quantificar a concentração de cobre em cachaça, por ser o parâmetro RGB de coeficiente mais preciso.

3.1.3. ANÁLISE DOS VALORES DE PIXELS

Após a obtenção da análise de imagens das amostras de cobre de concentrações de 1 mg/L a 4 mg/L, os dados foram inseridos no programa Octave para obtenção dos valores de absorbância das bandas RGB que foram inseridos em uma planilha do Excel. Com os resultados obtidos foi possível calcular o valor dos pixels normalizados, razão entre a média da banda que possui o coeficiente de determinação do ajuste polinomial mais preciso e a média do branco referente a essa mesma banda, para depois serem realizados os ajustes que melhor representam o modelo, em relação às bandas RGB para a quantificação de cobre em solução aquosa de etanol.

Figura 6: Valores dos pixels normalizados



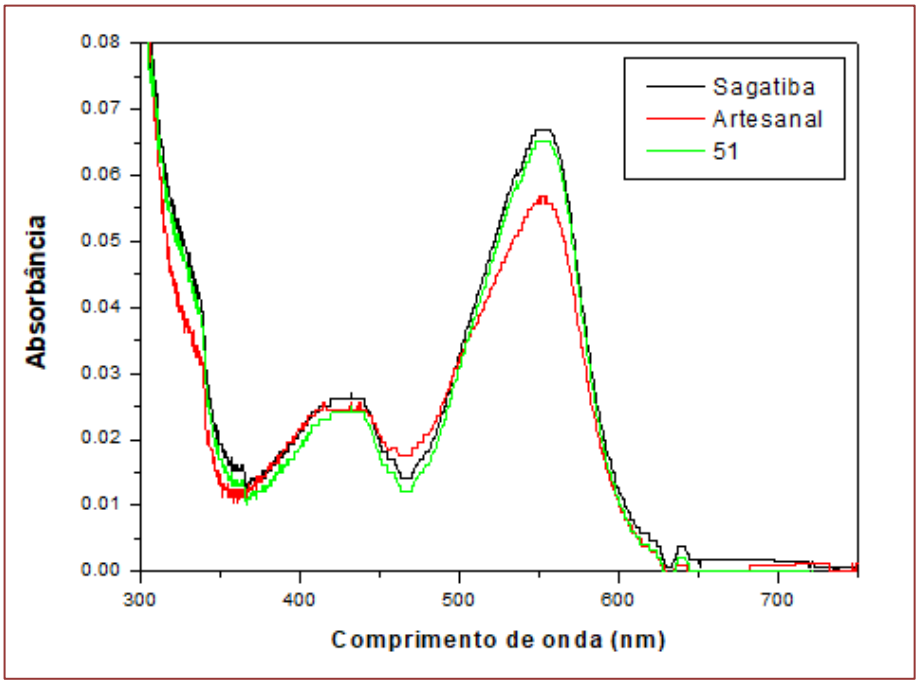
Os resultados apresentados na Figura 6 demonstram que a banda G apresentou um bom ajuste polinomial de 2°grau, apresentando um coeficiente de determinação R^2 de 0,989. O coeficiente de determinação da banda R foi de 0,136 e da banda B de 0,959.

3.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE COBRE EM DIFERENTES AMOSTRAS DE CACHAÇAS ARTESANAIS

Foram selecionadas 3 cachaças artesanais da região de Minas Gerais para análise de cobre, foram coletados os dados da leitura do espectrofotômetro e capturadas as fotos para serem analisadas pelo método de análise de imagem.

3.2.1. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS NO ESPECTROFOTÔMETRO

Figura 9: Gráfico de absorbância de cobre nas amostras



Foi observado na Figura 9 que existe presença de cobre nas três cachaças analisadas. O pico que representa a máxima absorção do complexo Cu (II)-PAN está ao redor de 550 nm e nesta região é possível observar que as amostras analisadas não possuem grandes variações na concentração de cobre, estão entre 3,06 mg/L e 3, 65 mg/L.

3.2.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE IMAGEM E ESPECTROFOTOMÉTRICO

Utilizando as equações obtidas pelo ajuste polinomial e linear dos métodos de análise de imagem e espectrofotometria respectivamente, foram calculados os valores das concentrações de cobre nas 3 amostras de cachaças artesanais da região de Minas Gerais (Tabela 2).

Tabela 2: Comparação das concentrações obtidas pelos métodos de análise de imagem e espectrofotométrico

Método /Amostra	1	2	3
Absorbância	3,428	3,425	3,422
Pixel Normalizado	3,214	3,213	3,215
Espectrofotometria	3,647	3,059	3,529

Foi observado que os valores encontrados das concentrações de cobre (II) nas amostras de cachaça utilizando o método proposto e por Espectrofotometria foram próximos, o que valida o método de análise de imagem utilizando smartphone.

3.2.3. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE DE IMAGEM E ESPECTROFOTOMÉTRICO

Utilizando os dados obtidos por meio de análise de imagem e espectrofotometria foram realizados ajustes polinomiais e linear respectivamente, obtendo coeficientes de determinação de cada equação obtida (Tabela 3).

Tabela 3: Comparação dos coeficientes de determinação obtidos pelos métodos de análise de imagem e espectrofotométrico

Método / Bandas	R	G	B
Absorbância	$R^2 = 0,121$	$R^2 = 0,985$	$R^2 = 0,955$
Pixel Normalizado	$R^2 = 0,136$	$R^2 = 0,989$	$R^2 = 0,959$
Espectrofotometria	R = 0,999		

4. CONCLUSÃO

A partir do método espectrofotômetro UV-vis, descrevemos o comportamento do complexo Cu(Ⅱ)-PAN e a determinação do teor de cobre em cachaças artesanais coletadas na região de Minas Gerais. De acordo com as análises apresentadas nesse relatório foi possível visualizar a presença de cobre(II) nas cachaças analisadas.

Após os testes foi percebido que mesmo possuindo contaminação de cobre na bebida, os parâmetros estão dentro do permitido pela legislação Brasileira, que autoriza um teor máximo de cobre em bebidas de 5 mg/L.

Foi observado nesta pesquisa que a faixa de concentração de cobre que possibilita uma melhor visualização do complexo Cu(Ⅱ)-PAN está entre 1 mg/L e 5 mg/L.

Todos os métodos mostraram bons resultados e os valores das concentrações de cobre calculadas nas amostras de cachaça na região de Minas Gerais foram muito próximos.

Os resultados das análises de imagens foram validados pelo método espectrofotométrico, comprovando que os resultados encontrados são promissores.

REFERÊNCIAS

[1] GOUVEIA, Clóvis. **Aguardentes**. Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Departamento de Química - DEQ. Paraíba. 28 de outubro, 2016. Disponível em: http://www.ct.ufpb.br/lba/contents/menu/produtos/aguardente Acesso em: 24 de agosto, 2023.

[2] SOUZA, João Carlos. **Determinação ìons cobre (II) em aguardente de cana-de-açúcar utilizando a combinação spot test - espectroscopia de reflectância difusa**. 2015. Tese (Pós-Graduação em Química) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2015.

[3] VENTURINI, Waldemar. **Aguardentes e cachaça**. 2013. Tese (Ciências Agronômicas) -

Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2013.

[4] ABÍLIO, Leandro. Determinação dos teores de cobre em cachaças produzidas no Espírito Santo. 2021. Tese (Química Industrial) - Instituto Federal do Espírito Santo, Vila Velha, 2021.

[5] OLIVEIRA, Ana Márcia. **O processo de produção da cachaça artesanal e sua importância comercial**. 2010. Monografia (Pós-Graduação em Microbiologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

[6] R.W. SANTOS DE OLIVEIRA, P.R. BARROS-GOMES, J.D. RIBEIRO, J.B. REIS, M. ALVES- FONTENELE, G. OLIVEIRA-EVERTON, W. DA SILVA-LYRA, H. COSTA-LOUZEIRO, M. DO LIVRAMENTO DE PAULA, V.E. MOUCHREK FILHO. **Determinação espectrofotométrica de Cobre (II) em aguardente de mandioca (Tiquira)**, Rev. Colomb. Cienc. Quím. Farm., 49(2), 355373 (2020)

Capítulo 9

Estudo da viabilidade técnica na utilização de solos como camadas de pavimento na cidade de Sousa/PB

Mayla Estrela Braga
Eduardo Morais de Medeiros
Francisca Alécia Leite Silva
André Luiz Lima de Andrade

Resumo: O estudo geotécnico realizado em um solo de loteamento em Sousa-PB teve como objetivo avaliar sua aplicabilidade em camadas de pavimentação. Para isso, foram executados ensaios de granulometria, limites de consistência, compactação e Índice de Suporte Califórnia (ISC), fundamentais para compreender as propriedades e o comportamento do material diante das cargas de tráfego. Os resultados mostraram predominância de solo arenoso, com presença de silte e argila, além de variações significativas de plasticidade entre as amostras. Observou-se que parte do material apresentou desempenho insuficiente no ISC, tornando necessária a adoção de melhorias, como estabilização química ou mistura com materiais mais resistentes. Assim, a pesquisa destacou não apenas as características do solo da região, mas também a importância da análise criteriosa na seleção de materiais, garantindo pavimentos mais eficientes, seguros e duráveis.

Palavras-chave: pavimentação, solo arenoso, plasticidade, Índice de Suporte Califórnia (ISC).

1. INTRODUÇÃO

As estradas e rodovias desempenham papel essencial no desenvolvimento econômico e social de um país, pois possibilitam a circulação de pessoas, mercadorias e veículos, promovendo a integração regional e facilitando o comércio, a produção agrícola e a industrialização. Além disso, garantem o acesso a serviços básicos, como educação, saúde e atendimento público, sobretudo em áreas remotas. A qualidade e a eficiência das vias impactam diretamente a competitividade econômica, tornando indispensáveis sua modernização e manutenção para assegurar segurança, fluidez no transporte e crescimento sustentável.

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade do solo de um loteamento em Sousa-PB para aplicação em pavimentação, por meio de ensaios geotécnicos. Foram realizadas análises de granulometria (Nbr 7181/2018), limites de liquidez e plasticidade (Nbr 6459/2016 e Nbr 7180/2016), compactação (Nbr 7182/2016) e Índice de Suporte Califórnia - ISC (Nbr 9895/2017).

O estudo da viabilidade do solo para construção de pavimentos é um processo indispensável nesse contexto, pois visa determinar suas características físicas, químicas e mecânicas, assegurando que o material seja capaz de suportar as cargas oriundas do tráfego de veículos. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), os principais parâmetros a serem considerados incluem plasticidade, compactação, deformabilidade sob carga e permeabilidade.

Fatores ambientais e climáticos também devem ser avaliados, visto que influenciam diretamente a durabilidade do pavimento. Na construção rodoviária, a análise das propriedades dos solos é essencial para a adequada composição das camadas que estruturam o pavimento, como subleito, sub- base, base e revestimento. Cada uma delas requer materiais com propriedades específicas capazes de resistir aos esforços e cargas aplicadas durante toda a vida útil da via (Azevedo et al., 1998).

2. MATERIAIS E METODOS

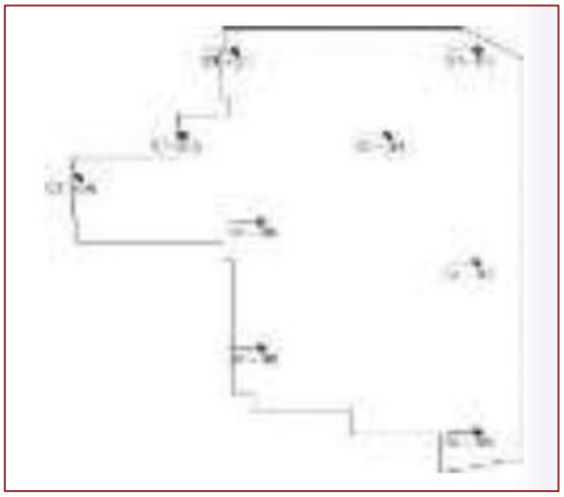
As amostras foram coletadas em campo, devidamente acondicionadas e ensaiadas em laboratório. Os resultados da granulometria possibilitaram traçar a curva de distribuição dos grãos; os ensaios de Atterberg forneceram o Índice de Plasticidade; a compactação determinou a umidade ótima e a massa específica seca máxima; e o ISC permitiu avaliar o desempenho do solo frente a condições de expansão e penetração. Com base nesses procedimentos, foi possível caracterizar as propriedades físicas e mecânicas do material e verificar sua adequação para uso em camadas de pavimentos rodoviários.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios laboratoriais foram essenciais para determinar as características físicas, químicas e mecânicas dos solos analisados. Os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros estabelecidos pelo DNIT, permitindo identificar variações entre as amostras e avaliar quais atendem ou não aos critérios exigidos para aplicação em pavimentação. As amostras utilizadas no estudo foram coletadas na cidade de Sousa/PB, em 9 locais distintos, por meio de sondagem a trado, seguindo rigorosamente o plano de coleta definido pela empresa, garantindo a representatividade do material analisado.

As amostras foram extraídas da camada de subleito do loteamento em estudo, garantindo uma representatividade adequada das condições do solo, conforme representando na Figura 1 e Tabela 1.

Figura 1- Locação dos pontos de sondagem



Fonte: Autor(2023).

Tabela 1 – Coordenadas UTM, em metros

Amostra	Coodenada NORTE	Coordenadas LESTE	Profundidade (m)
ST-01.A	9252896.893	581833.319	0 a 0,42
ST-01.B	9252896.893	581833.319	0,42 a 0,85
ST-01.C	9252896.893	581833.319	0,85 a 2,00
ST-02.A	9252892.422	582071.414	0,00 a 0,55
ST-02.B	9252892.422	582071.414	0,55 a 0,80
ST-02.C	9252892.422	582071.414	0,80 a 1,13
ST-03.A	9252787.818	581784.121	0,00 a 0,57
ST-03.B	9252787.818	581784.121	0,57 a 1,51
ST-04.A	9252788.864	581983.463	0 a 0,42
ST-04.B	9252788.864	581983.463	0,42 a 0,94
ST-04.C	9252788.864	581983.463	0,94 a 1,58
ST-05.A	9252738.748	581683.166	0,00 a 1,27
ST-06.A	9252685.913	581857.496	0,00 a 1,23
ST-07.A	9252637.654	582067.689	0,00 a 0,29
ST-07.B	9252637.654	582067.689	0,29 a 0,96
ST-08.A	9252535.438	581860.933	0,00 a 0,65
ST-08.B	9252535.438	581860.933	0,65 a 1,60
ST-09.A	9252433.768	582070.173	0,00 a 0,32
ST-09.B	9252433.768	582070.173	0,32 a 1,10

Fonte: Autor (2023).

Os resultados da análise granulométrica estão apresentados na Tabela 2**,** classificados de acordo com a proporção de cada tipo de material encontrado (pedregulho, areia, silte+argila).

Tabela 2 – Granulometria

Amostra	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte+Argila (%)	Classificação
ST-01.A	8,80	20,08	71,13	Silte areno-argiloso
ST-01.B	36,24	37,84	25,91	Areia média a grossa silto-argilosa com pedregulhos
ST-01.C	3,64	25,98	70,37	Silte areno-argiloso
ST-02.A	17,46	29,63	52,91	Areia média a grossa silto-argilosa com pedregulhos
ST-02.B	7,32	27,39	65,29	Silte areno-argiloso
ST-02.C	10,62	44,56	44,82	Silte areno-argiloso
ST-03.A	12,46	69,35	18,19	Areia média a grossa
ST-03.B	31,55	50,62	17,83	Areia média a grossa com pedregulho
ST-04.A	48,07	28,62	23,31	Areia média a grossa com
ST-04.B	11,09	40,37	48,54	Silte areno-argiloso
ST-04.C	10,84	48,12	41,03	Silte areno-argiloso
ST-05.A	26,93	57,72	15,35	Areia média grossa com
ST-06.A	21,43	26,78	51,79	Areia média a grossa com
ST-07.A	41,61	40,08	18,32	Areia média a grossa com pedregulhos
ST-07.B	48,85	32,16	18,99	Areia média grossa com
ST-08.A	16,86	54,99	28,15	Areia média a grossa com
ST-08.B	12,62	70,98	16,40	Areia média a grossa pouco
ST-09.A	29,06	22,12	48,82	Silte areno-argiloso com
ST-09.B	16,95	30,43	52,62	Silte areno-argiloso

Fonte: Autor(2023).

Das 19 amostras, foram constatadas que 57,89% são areia média a grossa e 42,11% são siltes arenosos. A Tabela 3 apresenta os valores encontrados nos ensaios. De acordo com a Tabela 3, 31,58% destas amostras se classificam como não plásticas, 21,05% pouco plásticos, 5,26% com plasticidade média e 42,10% muito plásticos. A divergência de valores nos resultados encontrados para cada categoria se dá pela diferença nos tipos de solos analisados.

Tabela 3 – Limites de Atterberg

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
ST-01.A	42,00	NP	NP
ST-01.B	50,0	29,0	21,0
ST-01.C	38,0	14,0	24,0
ST-02.A	51,0	50,0	1,0
ST-02.B	50,0	33,0	17,0
ST-02.C	40,0	35,0	5,0
ST-03.A	NL	NP	NP
ST-03.B	17,0	NP	NP
ST-04.A	25,0	18,0	7,0
ST-04.B	34,0	18,0	16,0
ST-04.C	47,0	31,0	16,0
ST-05.A	NL	NP	NP
ST-06.A	24,0	22,0	2,0
ST-07.B	30,0	14,0	16,0
ST-08.A	22,0	11,0	11,0
ST-08.B	19,0	NP	NP
ST-09.A	33,0	16,0	17,0
ST-09.B	46,0	30,0	16,0

Fonte: Autor(2023).

O teor de umidade ótimo e massa específica (Tabela 4) são itens fundamentais para a construção de estradas, visto que o material utilizado na pavimentação obedece a umidade ótima encontrada, assim, os resultados obtidos com o ensaio de compactação são indispensáveis para pavimentação.

Tabela 4 – Compactação

Amostra	W ótima (%)	Massa específica (g/cm^3)
ST-01.A	6,6	2,08
ST-01.B	11,4	1,87
ST-01.C	16,0	1,73
ST-02.A	13,4	1,81
ST-02.B	11,6	1,75
ST-02.C	18,8	1,67
ST-03.A	8,4	1,98
ST-03.B	8,6	2,04
ST-04.A	7,6	2,08
ST-04.B	24,2	1,64
ST-04.C	26,4	1,53
ST-05.A	7,4	2,04
ST-06.A	12,8	1,89
ST-07.A	7,7	2,13
ST-07.B	11,4	1,94
ST-08.A	8,8	2,04
ST-08.B	10,1	2,04
ST-09.A	17,3	1,71
ST-09.B	22,2	1,62

Fonte: Autor(2023).

Segundo o DNIT (2006), SIURB/PMSP (2004) e AGETOP (2016), os valores recomendados para expansão são menores ou iguais a 2%, enquanto que o ISC seja maior ou igual a 2%. Analisando estas recomendações foi apresentado na Tabela 5 quais amostras atendem ou não a estes critérios.

Tabela 5 – ISC

Amostra	Expansão (%)	ISC (%)	Atendem aos critérios
ST-01.A	0,09	44	SIM
ST-01.B	0,39	0	NÃO
ST-01.C	5,75	1	NÃO
ST-02.A	0,35	1	NÃO
ST-02.B	0,04	1	NÃO
ST-02.C	3,76	2	NÃO
ST-03.A	0,04	58	SIM
ST-03.B	-0,12	28	SIM
ST-04.A	0,27	15	SIM
ST-04.B	1,46	1	NÃO
ST-04.C	0,04	9	SIM
ST-05.A	0,21	11	SIM
ST-06.A	1,70	3	SIM
ST-07.A	-0,07	39	SIM
ST-07.B	0,00	9	SIM
ST-08.A	0,01	8	SIM
ST-08.B	0,39	7	SIM
ST-09.A	5,50	3	NÃO
ST-09.B	1,16	6	SIM

Fonte: Autor (2023).

No entanto, ao avaliar os valores obtidos no ensaio de ISC, verificou-se que algumas amostras não atenderam aos critérios satisfatórios (Tabela 6) recomendados pelo DNIT (2006) para utilização na camada de subleito.

Tabela 6 – Resumo das amostras

Amostra	Utilização
ST-01.A	Subleito
ST-01.B	-
ST-01.C	-
ST-02.A	-
ST-02.B	-
ST-02.C	-
ST-03.A	Subleito
ST-03.B	Subleito
ST-04.A	Subleito
ST-04.B	-
ST-04.C	Subleito
ST-05.A	Subleito
ST-06.A	Subleito
ST-07.A	Subleito
ST-07.B	Subleito
ST-08.A	Subleito
ST-08.B	Subleito
ST-09.A	-
ST-09.B	Subleito

Fonte: Autor (2023).

Para que o solo possa ser utilizado no subleito, é necessário realizar um estudo mais aprofundado, considerando aspectos como a regularização dessa camada. Será preciso adotar medidas adequadas para melhorar suas características e torná- lo compatível com os requisitos de resistência e capacidade de suporte exigidos para a pavimentação rodoviária.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo revelou-se de extrema relevância, pois permitiu uma análise detalhada das amostras de solo de um loteamento na cidade de Sousa- PB, por meio de estudos geotécnicos, com o objetivo de avaliar sua adequação como camada de pavimento. Ao realizar o ensaio de granulometria, constatou- se que as amostras possuem características predominantemente arenosas, com presença de silte e argila.

Os materiais arenosos variam entre 20,08% e 70,98%, enquanto a parte fina composta por silte+argila apresenta valores entre 15,35% e 71,13%. No entanto, foi observado que esse material apresenta má graduação para pavimentação, devido à sua plasticidade variável, que pode ser classificada como não plástica, mediana e altamente plástica.

Quanto aos ensaios de compactação, verificou-se uma variação nos níveis de umidade, que variaram entre 6,6% e 26,4%. Essa variação ocorre devido à composição predominante de areia, porém também com presença de finos.

Para a avaliação da viabilidade do solo, o ensaio de ISC é o mais significativo. Ao analisar

os resultados obtidos, verificou-se que o solo em estudo apresenta variações, onde algumas amostras atendem aos parâmetros estabelecidos, enquanto outras não. Dessa forma, o estudo realizado evidenciou que mesmo em um único local, o solo pode apresentar comportamentos distintos.

Portanto, conclui-se que 63,16% do material estudado pode ser utilizado em camadas de subleito para fins rodoviários, enquanto 36,84% não se adequam as recomendações estabelecidas para reforço de subleito, base ou sub-base.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9895 - **Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2017.

[2] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459 - **Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 2016.

[3] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180 - **Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 2016.

[4] ABNT, AssociaçãoBrasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 – **Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2018.

[5] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7182 - **Ensaio de Compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

[6] AZEVEDO, J. M. N.; FERNADEZ, M. F.; ARAÚJO, R. **Manual de Mecânica** Dos **Solos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669p.

[7] DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

Capítulo 10

Desempenho geotécnico de solo utilizado na camada de cobertura final de aterro sanitário

Melissa da Silva Leite
Maria Eduarda Menezes Evangelista
Rayanna Nathiely Silva Nascimento Nogueira
Adla Jamilly Vieira Felipe
William de Paiva

Resumo: O desempenho geotécnico de solos em camadas de cobertura de aterros sanitários é determinante para a eficiência do confinamento de resíduos e a mitigação de impactos ambientais. Este estudo avaliou o solo utilizado na cobertura final do Aterro Sanitário de Campina Grande – PB, por meio de ensaios laboratoriais de caracterização física, compactação e permeabilidade à água, conforme normas da ABNT e ASTM. Os resultados indicaram a presença expressiva de areia, além de um percentual de finos (52,04%) e limites de consistência abaixo das recomendações da Nbr 6459/2016 e Nbr 7180/2016, conforme detalhado na metodologia. A classificação obtida foi de silte de baixa plasticidade (ML), fora das categorias indicadas para uso em camadas de cobertura. Contudo, o coeficiente de permeabilidade a água encontrado ($3{,}71\times10^{-8}$ $m\cdot s^{-1}$) está dentro da faixa típica de solos siltosos e atende às exigências de baixa percolação. Portanto, pode-se concluir que o solo analisado pode ser utilizado como camada de cobertura final de aterro sanitário, apesar de possuir limitações devido aos limites de consistência e as classificações não atenderem aos recomendados.

Palavras-chave: monitoramento geoambiental, permeabilidade do solo à água, solo compactado, propriedades geotécnicas.

1. INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são infraestruturas de engenharia projetadas para a disposição final de resíduos sólidos urbanos, com o propósito de minimizar os riscos ambientais e à saúde pública. Essas instalações são formadas por várias estruturas interligadas, que incluem uma camada impermeabilizante na base, sistemas de drenagem para gerenciar o lixiviado, captação de gases e uma camada de cobertura que isola os resíduos, limita a infiltração de água e regula a emissão de gases prejudiciais, assegurando a proteção ambiental e a segurança operacional durante toda a sua vida útil (Dias; Balieiro; Pedreiro, 2024).

A camada de cobertura final, denominada liner geralmente é constituída por solo compactado e está continuamente sujeita a agentes externos, como intemperismo, ciclos de umedecimento e secagem e variações climáticas, os quais podem modificar suas propriedades e comprometer seu desempenho hidráulico. Nesse contexto, a permeabilidade à água se torna o parâmetro mais crítico, pois controla diretamente a taxa de infiltração de líquidos no maciço de resíduos e, consequentemente, influencia a geração de lixiviados e o risco de contaminação ambiental (Araujo, 2024).

A percolação da água em meios porosos fundamenta-se na teoria proposta por Henry Darcy (1856), que estabelece a relação entre a velocidade de percolação e o gradiente de carga hidráulica, definida pelo coeficiente de permeabilidade (k), e varia em função do material e do fluido considerado (Araújo; Oliveira, 2024). Esse índice, entretanto, é influenciado por fatores como granulometria, grau de saturação, composição mineralógica e índice de vazios, que podem sofrer alterações conforme as condições de campo. Considerando a relevância da cobertura para o desempenho dos aterros, torna-se essencial avaliar seu comportamento geotécnico em diferentes condições (Jesus, 2012).

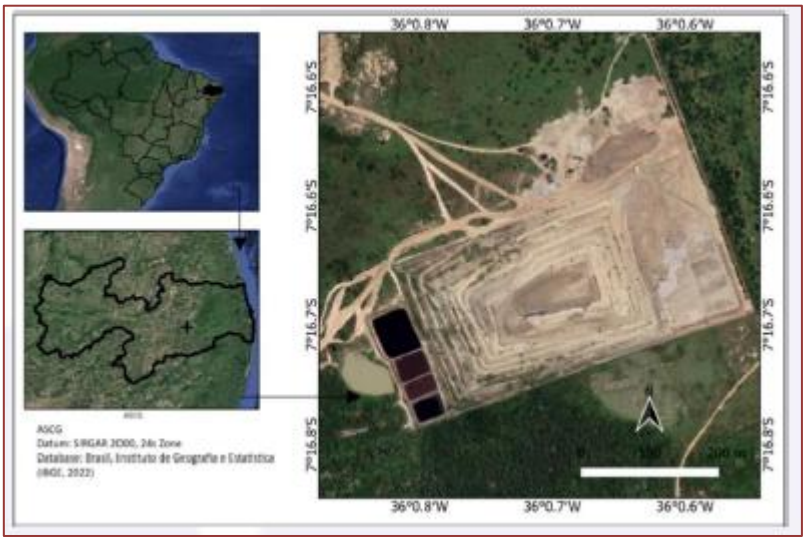
Dessa forma, este artigo tem como objetivo analisar as características e os parâmetros geotécnicos, com ênfase na permeabilidade à água, de uma amostra de solo coletada na camada de cobertura do Aterro Sanitário em Campina Grande, proveniente de uma jazida localizada nas proximidades do empreendimento, avaliando sua adequação às normas técnicas e seu desempenho quanto ao controle do fluxo de água.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida no Aterro Sanitário localizado em Campina Grande (ASCG), a aproximadamente 10 km da área urbana, na Fazenda Logradouro II, distrito de Catolé de Boa Vista, Paraíba, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: Imagem aérea do Aterro Sanitário em Campina Grande – PB



Fonte: Autoria própria (2025).

O ASCG recebe, em média, 774 toneladas/dia, provenientes de 71 municípios da Paraíba e Pernambuco. O ASCG, apresentado na Figura 1, possui quatro células encerradas, com altura aproximada de 40m, apresentando taludes de 1:2 e bermas intermediárias de 6m.

A camada de cobertura final do ASCG compreende solo compactado, obtido em jazidas adjacentes, aplicado mecanicamente sobre os resíduos, com espessura final entre 0,60 m e 1,50 m. Sem cobertura vegetal, torna-se mais suscetível à erosão, à infiltração de águas pluviais e à emissão de partículas sólidas para a atmosfera.

2.2. COLETA DE SOLO

O solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário é proveniente do leito de um reservatório vazio (barragem de terra) próximo a região onde ele está situado (Figura 2). O material retirado da jazida era disposto ao ar livre no estoque de solos onde os caminhões têm acesso para sua coleta e transporte até as células do Aterro.

Figura 2: Jazida de solo

Fonte: Autoria Própria (2025).

A coleta do solo para realização dos ensaios procedeu-se obedecendo à norma Nbr 9604 (ABNT, 2016), que estabelece as condições para a abertura de poços e trincheiras de inspeção em solo e para a retirada de amostras de solo deformadas e indeformadas para uso em investigações geotécnicas e projetos de engenharia. Logo, essas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) como amostras deformadas.

2.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

O material coletado foi levado para o LGA na Universidade Federal de Campina Grande, onde foi seco ao ar livre e destorroado, conforme citado em norma Nbr 6457 (ABNT, 2024). Em seguida, foi submetido aos ensaios de caracterização dispostos na Tabela 1, seguindo as respectivas normas técnicas brasileiras.

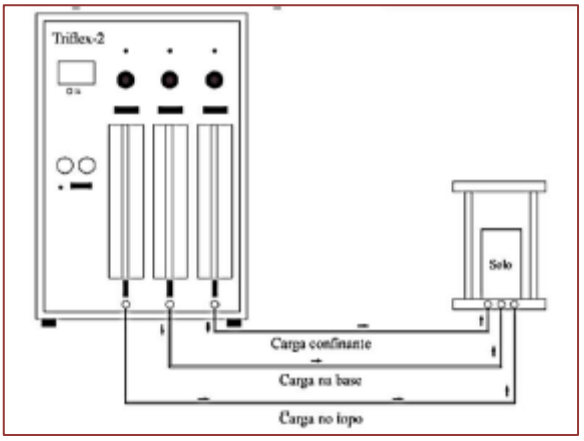
Tabela 1: Ensaios de caracterização dos solos e normas

Ensaio	Norma
Teor de Umidade	Nbr 6457/2024
Massa Específica	Nbr 6458/2025
Análise Granulométrica	Nbr 7180/2025
Limite de Liquidez	Nbr 6459/2016
Limite de Plasticidade	Nbr 7180/2016
Compactação	Nbr 7182/2025

Fonte: Autoria Própria (2025).

A permeabilidade à água da amostra de solo compactado, utilizada como camada de cobertura do aterro, foi determinada por meio de ensaios realizados em permeâmetro de parede flexível e carga constante (Sistema de Teste de Permeabilidade Triflex-2, da ELE International Inc./Soiltest Products Division), conforme os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D5084 (2016). Os ensaios foram conduzidos a uma temperatura controlada de 20 ± 1 °C, empregando o método de carga constante e amostras compactadas na umidade ótima obtida pelo ensaio Proctor Normal. O Sistema Triflex-2 possibilita a aplicação de pressões confinantes e gradientes hidráulicos, tanto na base quanto no topo da amostra, utilizando diferentes tipos de fluidos, com controle preciso por meio de seu painel principal (Maciel, 2003). A configuração do Sistema Triflex-2 está representada na Figura 3.

Figura 3: Esquema para o ensaio de permeabilidade saturada à água do solo



Fonte: Araujo (2024).

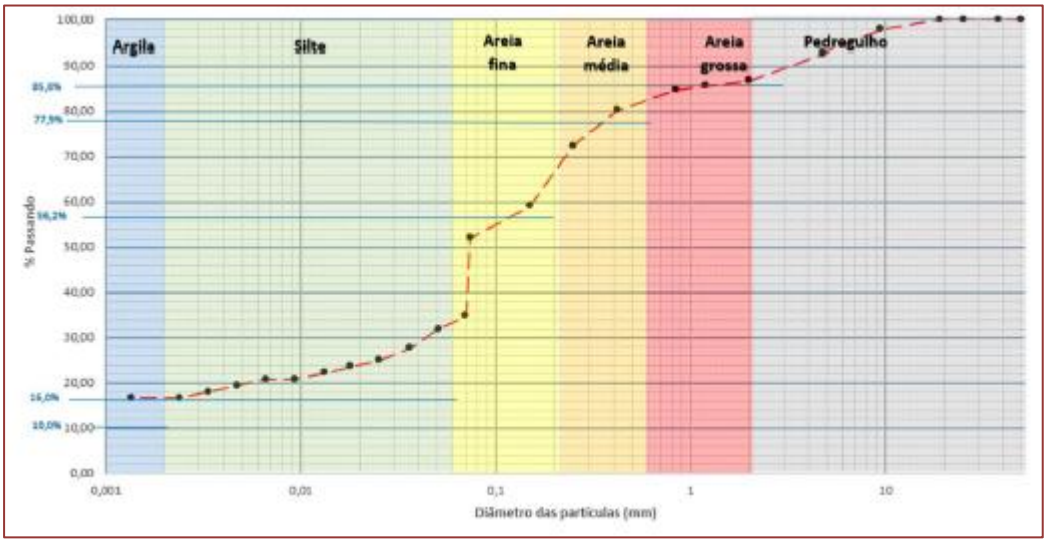
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

3.1.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica do solo em estudo e a Tabela 2 expõe as respectivas frações granulométricas do solo. O percentual de finos (φ < 0,075 mm) obtido foi de 52,04%, satisfazendo as recomendações mínimas estabelecidas pela USEPA (2004), CETESB (1993) e União Europeia (1999), as quais indicam que o teor de finos deve ser superior a 30%.

Figura 5: Distribuição granulométrica



Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 2: Resumo da granulometria

Amostra de solo	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Φ<0,075 mm (%)
1	7,26	7,86	12,41	40,51	12,50	19,46	52,04

Fonte: Autoria Própria (2025).

A queda acentuada observada entre o valor mínimo do peneiramento fino e o início da sedimentação pode estar relacionada a eventuais inconsistências na execução do ensaio. Entre as possíveis causas, destaca-se a ocorrência de perda de material durante o ensaio de sedimentação, principalmente durante a transferência da amostra, o que reduziria a massa efetiva de partículas em suspensão.

3.1.2. LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Na Tabela 3, estão apresentados os valores obtidos para os limites de Atterberg, para a amostra de solo analisada.

Tabela 3: Limites de Consistência

LL (%)	LP (%)	IP (%)
22,00	18,00	4,00

Fonte: Autoria Própria (2025).

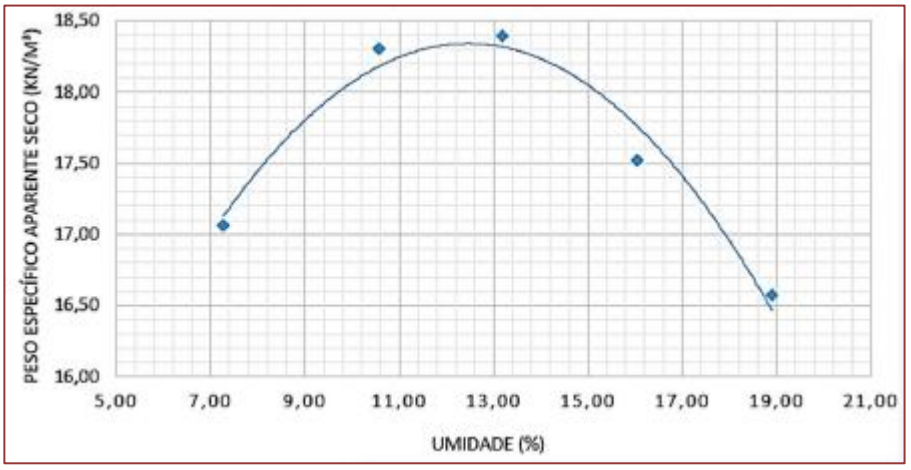
De acordo com os critérios de limites de consistência estabelecidos pela CETESB (1993), que recomenda IP ≥ 15% e LL ≥ 30%, pela USEPA (2004), que admite 7% ≤ IP ≤ 15%, e pela Diretiva da União Europeia (1999), que sugere 20% ≤ IP ≤ 30%, a amostra analisada, não se enquadra em nenhuma das condições estabelecidas.

Quanto à classificação, o solo foi caracterizado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), sendo enquadrado como um silte de baixa plasticidade (ML). No entanto, a CETESB (1993) recomenda para a camada de cobertura de aterros sanitários os solos classificados como CL, CH, SC e OH, devido às propriedades geotécnicas que esses solos possuem como alta porcentagem de partículas finas (>30%), limites de liquidez elevados (≥30%) e índice de plasticidade adequado, que garantem boa plasticidade e capacidade de compactação.

3.1.3. COMPACTAÇÃO

A Figura 6, apresenta a curva de compactação do solo para a energia Proctor Normal. Vale salientar que não existem regulamentações nacionais que especifiquem os parâmetros mínimos requeridos para compactação do solo da camada de cobertura de aterros sanitários.

Figura 6: Curva de compactação



Fonte: Autoria Própria (2025).

Na análise de solos arenosos destinados à elaboração de camadas de cobertura oxidativas, van Verseveld e Gebert (2020) encontraram umidades ótimas de 10,6% e 13,1%, e pesos específicos secos máximos de 19 kN/m^3 e 17,6 kN/m^3, valores que foram atendidos na amostra analisada neste estudo, conforme resultados apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros para a compactação

Umidade ótima (%)	γmáx (kN/m^3)	Índice de vazios (e)	Grau de saturação (%)
12,47%	18,35	0,44	75,11%

Fonte: Autoria Própria (2025).

3.2. PERMEABILIDADE À ÁGUA

Na Tabela 5, está disposto o resultado do ensaio de permeabilidade à água em permeâmetro de parede flexível com o solo da amostra estudada.

Tabela 5: Permeabilidade à água do solo

$W_{ótima}$ (%)	Índice de Vazios (e)	Grau de Saturação S - (%)	$k_{água}$ (m.s^{-1})
12,47	0,44	75,11	$3{,}71 \times 10^{-8}$

Fonte: Autoria Própria (2025).

A permeabilidade obtida enquadra-se na faixa típica de solos siltosos (10^{-6} a 10^{-9} m·s^{-1}) descrita por Pinto (2006) e caracteriza baixa permeabilidade segundo Marques et al. (2021), atendendo às exigências para uso em camadas de cobertura de aterros.

3.3. DISCUSSÃO GERAL

De forma integrada, os resultados indicam restrições ao uso do solo como camada de cobertura em aterros sanitários. Classificado como silte de baixa plasticidade (ML), fora das categorias recomendadas pela CETESB (1993), pode ser empregado mediante adequações, como aumento da espessura da camada, controle rigoroso da compactação ou mistura com materiais mais plásticos. A baixa compressibilidade, destacada por Mariano (2008), Lopes (2011), Oliveira (2013) et al., é uma característica favorável ao uso em aterros, pois garante maior estabilidade estrutural, reduz recalques e aumenta a vida útil da estrutura. Solos com essa propriedade, geralmente bem compactados ou de granulometria fina, apresentam menor permeabilidade e formação de vazios.

O solo apresentou peso específico dos grãos igual a 26,39 kN/m^3, com predominância de frações arenosas e presença de minerais que tendem a reduzir a capacidade de retenção de umidade nas camadas superficiais. Verificou-se, ainda, um teor de 52,04% de finos (< 0,075 mm), característica que influencia significativamente os processos de percolação de líquidos e gases (Carvalho et al., 2023). A distribuição granulométrica não uniforme impacta diretamente propriedades geotécnicas essenciais, como a retenção de água, a resistência ao cisalhamento e a susceptibilidade à formação de fissuras (Freire, 2022).

Nos ensaios de compactação, a amostra apresentou umidade ótima de 12,47% e peso específico aparente máximo de 18,35 kN/m^3, valores próximos aos reportados para areias finas (Pinto, 2006), confirmando a representatividade da composição granulométrica. Quanto à consistência, o baixo índice de plasticidade (IP = 4%) evidencia a baixa coesão do material, fator que pode comprometer a estabilidade da camada em ciclos de umedecimento e secagem. Já a permeabilidade, de $3{,}71\times10^{-8}$ m·s^{-1}, atende às exigências funcionais e encontra respaldo em estudos de Soares et al. (2017) e CETESB (2021), que recomendam coeficientes da ordem de 10^{-9} m·s^{-1} para solos aplicados em bases e coberturas de aterros.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que o solo analisado, classificado como silte de baixa plasticidade (ML), não atende integralmente às especificações para utilização em camadas de cobertura de aterros sanitários. No entanto, suas propriedades indicam potencial de aplicação em situações específicas, desde que sejam adotadas medidas corretivas ou complementares que assegurem o atendimento aos requisitos de desempenho, garantindo, dessa forma, sua eficiência e segurança ambiental.

REFERÊNCIAS

[1] ALMEIDA, Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque. Avaliação do desempenho das camadas de cobertura de aterro sanitário para a redução de emissões de gases de efeito estufa. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

[2] ARAÚJO, D. de C.; OLIVEIRA, I. F. de. Determinação da condutividade hidráulica em aterro controlado e sanitário: um estudo comparativo utilizando o permeâmetro de Guelph. Revista Contemporânea, [S. l.], v. 4, n. 10, p. 1–20, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N10-168. Disponível em: https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/6269. Acesso em: 23 ago. 2025.

[3] ARAUJO, P. da S. Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)

– Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

[4] ARAUJO, P. da S. Fluxo de água e gás em camada de cobertura final de solo compactado em aterro sanitário. 2024. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6457: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7181: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7182: Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9813: Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

[12] BARROS, L. S. S.; PREVIERO, C. A. Gestão de resíduos sólidos: a importância das legislações ambientais no contexto dos aterros sanitários. Revista Sociedade Científica, v. 8, n. 1, p. 204- 225, 2025. DOI: 10.61411/rsc202593518.

[13] COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Resíduos sólidos industriais. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993.

[14] COSTA, MAGDALENA DUARTE. Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos. 2015. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

[15] DIAS, F. B.; BALIEIRO, L. T.; PEDREIRO, M. Aterros sanitários: gestão de resíduos sólidos e sustentabilidade ambiental. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, São Paulo, v. 10, n. 12, p. 2891-2936, dez. 2024. DOI: 10.51891/rease.v10i12.17465.

[16] FREIRE, SAMARA CASTRO. Estudo geotécnico da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), Ceará. 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

[17] GOMES, GUILHERME JOSÉ CORREIA. Comportamento de misturas de solo e composto orgânico para dimensionamento de camadas de cobertura de depósitos de resíduos sólidos urbanos. 2018. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018..

[18] JESUS, L. S. de. Estudo da permeabilidade dos solos de fundação do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP. 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

[19] LIRA, B. S. Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

[20] LOPES, R. L. Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

[21] MACIEL, Felipe Jucá. Estudo da geração, percolação e emissão de gases do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade

Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

[22] MARIANO, M. O. H. Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos. 2008. 225f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

[23] MARQUES, Rosângela Francisca de Paula Vitor; SILVA, Antônio Marciano da; RODRIGUES, Luciano dos Santos; MENDES, Luana Ferreira; OLIVEIRA, Alisson Souza de. Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos no solo em municípios de Minas Gerais – Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1382–1392, 2021. DOI: 10.26848/rbgf.v14.3.p1382-1392. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245105. Acesso em: 9 out. 2025.

[24] OLIVEIRA, L. G. Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

[25] OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. Comportamento geotécnico de misturas compactadas de solo argiloso com fibras curtas de coco. 2018. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

[26] PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas: com exercícios resolvidos. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. ISBN 978-85-86238-51-2.

[27] PERRONI, H. P. Contribuição metodológica para análise preliminar de potenciais áreas de aterros sanitários com auxílio do software QGIS: estudo de caso: município de Vargem Grande do Sul-SP. 2021. 185 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Superior da CETESB, São Paulo, 2021. Disponível em: http://cetesb.sp.gov.br/escolasuperior/producaotecnico-cientifica/. Acesso em: 23 ago. 2025.

[28] SOARES, R. F.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos – Caieiras. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 5, p. 993-1003, 2017. doi: https://doi.org/10.1590/S1413-41522017155522.

[29] VAN VERSEVELD, C. J. W.; GEBERT, J. Effect of compaction and soil moisture on the effective permeability of sands for use in methane oxidation systems. Waste Management, v. 107, p. 44-53, 2020.

Capítulo 11

O uso de captações de tempo seco frente à universalização do esgotamento sanitário

Frederico Menezes Coelho

Resumo: O saneamento básico no Brasil ainda é um desafio significativo, conforme análise dos dados autodeclarados pelos prestadores de serviço ao antigo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), revelando que em 2022 apenas 56% da população nacional possuía atendimento de esgotamento sanitário. No Estado do Rio de Janeiro, a situação não é muito diferente, com apenas 29 dos 97 municípios declarando atendimento superior a 80%. Esses números, no entanto, incluem inadvertidamente uma prestação disfuncional, onde volumes de esgoto escoam em galerias de águas pluviais (GAPs). Essa prática resulta em impactos ambientais visíveis, como as frequentes "línguas negras" em praias após chuvas intensas, comprometendo a imagem de importantes destinos turísticos. A Lei 11.445/2007, de diretrizes do Saneamento Básico, no que se refere a esgotamento sanitário, estabeleceu a ambiciosa meta de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033. Apesar de permitir, num primeiro momento, considerar o transporte em GAPs como medida temporária, a lei exige que as entidades reguladoras estabeleçam metas para a substituição do suposto "sistema unitário" pelo separador absoluto. Esse trabalho apresenta critérios e normas para a regulação de projetos de estruturas de Captações de Tempo Seco (CTSs), introduzindo os parâmetros de projeto estabelecidos pela Instrução Normativa 134 da AGENERSA, o projeto de norma da ABNT, e sugere o desenvolvimento de protocolos adequados de manutenção e operação das CTSs, estruturas necessárias durante a implantação da rede coletora e mesmo após a universalização do serviço, atuando como verificador da eficácia do separador absoluto.

Palavras-chave: Sistemas de esgoto, Sistema separador, Captação de Tempo Seco. CTS. Universalização.

1. INTRODUÇÃO/OBJETIVOS

Conforme os dados autodeclarados do SNIS 2023, apenas 56,00% da população nacional é atendida com esgotamento sanitário (Figura 1). De acordo com o mesmo sistema de dados, dos 97 municípios do Rio de Janeiro, apenas 29 informaram atendimento maior que 80% (10 municípios na faixa de 80,00 a 89,99 e 19 com atendimento igual ou superior a 90,00%). A Figura 2 mostra a evolução dos indicadores de coleta (IN015), de tratamento (IN046) e de atendimentos urbano (IN056) e total (IN024) no Estado do Rio de Janeiro, baseados nos dados declarados de 1995 a 2022.

Figura 1-Dados declarados do atendimento com esgotamento sanitário no Brasil (SNIS, 2025)

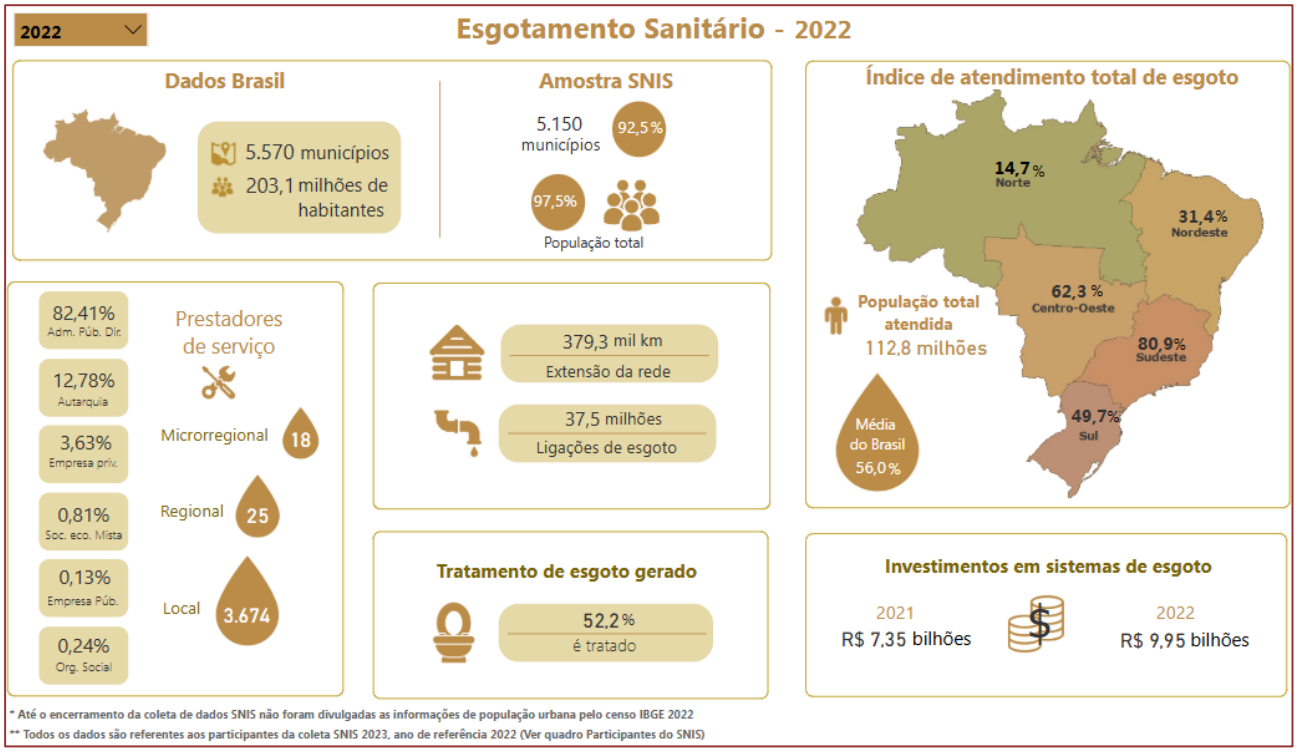
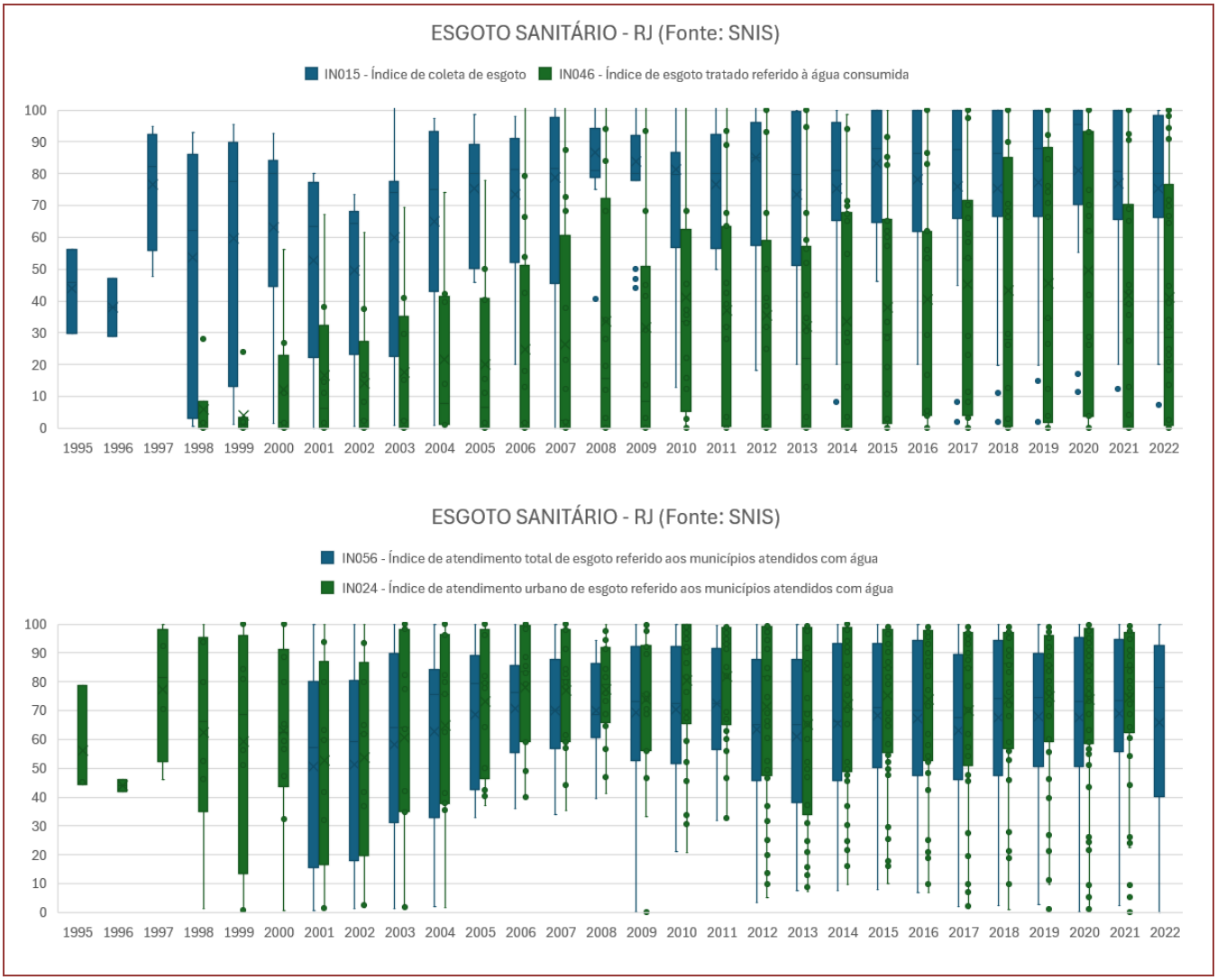


Figura 2-Evolução de 1995 a 2022 dos indicadores (%) de esgoto sanitário no RJ (SNIS, 2025)



Esses valores declarados, tanto em nível nacional quanto no Estado do Rio de Janeiro, no entanto, representam não só a parcela transportada em coletores de esgoto, nos chamados sistemas separadores absolutos, como também, os volumes de esgotos que escoam irregularmente nas galerias de águas pluviais (GAPs), numa prestação disfuncional, porque não caracteriza um sistema unitário, conforme Azevedo Netto (2012), Coelho (2022) e a ABNT (2025) no projeto de norma Nbr 17253:

> 4.2 A finalidade da captação em tempo seco não implica na conversão do sistema de drenagem pluvial urbana em um sistema de esgotamento sanitário do tipo unitário.

Ademais, o sistema abrangido pelos CTSs é disfuncional porque o sistema unitário é proibido no Estado do Rio de Janeiro, conforme parágrafo 1° do artigo 277 de sua Constituição (ALERJ, 2025):

> Art. 277 - Os lançamentos finais dos sistemas públicos e particulares de coleta de esgotos sanitários deverão ser precedidos, no mínimo, de tratamento primário completo, na forma da lei.

> § 1º - Fica vedada a implantação de sistemas de coleta conjunta de águas pluviais e esgotos domésticos ou industriais.

Equivocadamente, alguns prestadores de serviços de esgoto incluíram as GAPs e CTSs nos dados apresentados que compuseram os indicadores de atendimento com esgotamento sanitário, ocultando, assim, os reais valores para sistema separador absoluto com economias realmente ativas de esgoto.

Frequentemente se observa, após eventos de chuvas intensas nas cidades litorâneas, o surgimento de línguas negras nas praias, resultado do extravasamento das chamadas captações de tempo seco (CTSs), que tanto afetam a imagem de vários "cartões postais", caso dos interceptores oceânicos de esgoto com diversas contribuições em tempo seco (CTSs) na Zona Sul do município do Rio de Janeiro (Coelho, 2022).

O Novo Marco do Saneamento, instituído na Lei Federal 14.026 de 15 de julho de 2020 (Brasil, 2020), modificando a Lei 11.445, de 5 de janeiro de 2007, com o objetivo de aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, estabeleceu o prazo de 31 de dezembro de 2033 para o atendimento de "90% (noventa por cento) da população com coleta e tratamento de esgotos".

Apesar de, num primeiro momento, permitir considerar o transporte em GAPs como cobertura de esgotamento sanitário, a Lei exige que a entidade reguladora infranacional estabeleça metas de substituição do "sistema unitário" pelo separador absoluto, contando como "obrigatório o tratamento dos esgotos coletados em períodos de estiagem, enquanto durar a transição" (Brasil, 2020).Conforme a ANA (2024), isso pode ser atendido pela existência das CTSs, que são construídas como intervenções que conduzem os esgotos, a partir das GAPs, para tubulações, chamadas interceptores, e então para elevatórias e estações de tratamento de esgoto (ETEs).

Pela ausência de regulamentação e pelo desconhecimento técnico da Nbr 12207 (ABNT, 2016) por parte dos prestadores de serviço, quanto ao projeto e construção das CTSs, muitas dessas estruturas foram feitas de maneira improvisada, subdimensionada e pouco eficaz operacionalmente (redes afogadas em tempo seco etc.). Por isso, a AGENERSA (2025a) publicou a Instrução Normativa (IN) n.º 134, que "dispõe sobre os procedimentos para uniformização das regras para entrega de projetos executivos pelas concessionárias de saneamento", com o item 4.5.4 dedicado ao assunto.

Cabe destacar que a IN 134 da AGENERSA (2025a) foi amplamente discutida com as concessionárias de esgoto (prestadores de serviço) reguladas por esta no Estado do Rio de Janeiro, que revisou a anterior IN 116 (AGENERSA, 2024), mas manteve o item específico sobre CTSs desta. Portanto, essa IN é antecessora à ABNT em relação às diretrizes de uma norma para projeto de estruturas de Captações de Tempo Seco (CTSs).

Por outro lado, a normatização de CTSs já tem critérios e diretrizes bem definidos na NBR 12207 (ABNT, 2016) desde 1992 (ABNT, 1992), porque são dispositivos do chamado interceptor de esgoto sanitário com contribuição de tempo seco.

A fim de minimizar os impactos causados pelos extravasamentos, a operadora do serviço de esgotamento sanitário deve ainda ter um protocolo de manutenção de tais estruturas, com rotinas de limpeza, inclusive das GAPs, além de um protocolo diferenciado para eventos de chuva, com fechamento temporário da CTS ou um certo aumento da vazão das elevatórias, quando necessário.

Após a implantação plena da cobertura do sistema separador, as CTSs talvez ainda sejam necessárias para a proteção de alguns corpos hídricos, evitando a contaminação por ligações clandestinas no coletor tipo separador absoluto. No entanto, é importante a inspeção das galerias para que tais ligações irregulares sejam coibidas.

Também em áreas onde características de relevo, urbanização ou segurança não permitam a implantação do sistema separador, o uso de CTS pode ser justificável, observando sempre a necessidade de protocolos específicos para isso.

Esse trabalho então se propõe a apresentar parâmetros de projeto estabelecidos pela Instrução Normativa 134 da AGENERSA, os pontos sugeridos de alteração do Projeto de Norma ABNT Nbr 17253 e o desenvolvimento de protocolos adequados de manutenção e operação das CTSs, estruturas necessárias durante a implantação da rede coletora e até mesmo após a universalização do serviço, como complementar e verificador da eficácia do sistema separador absoluto exigido pela Lei do Saneamento.

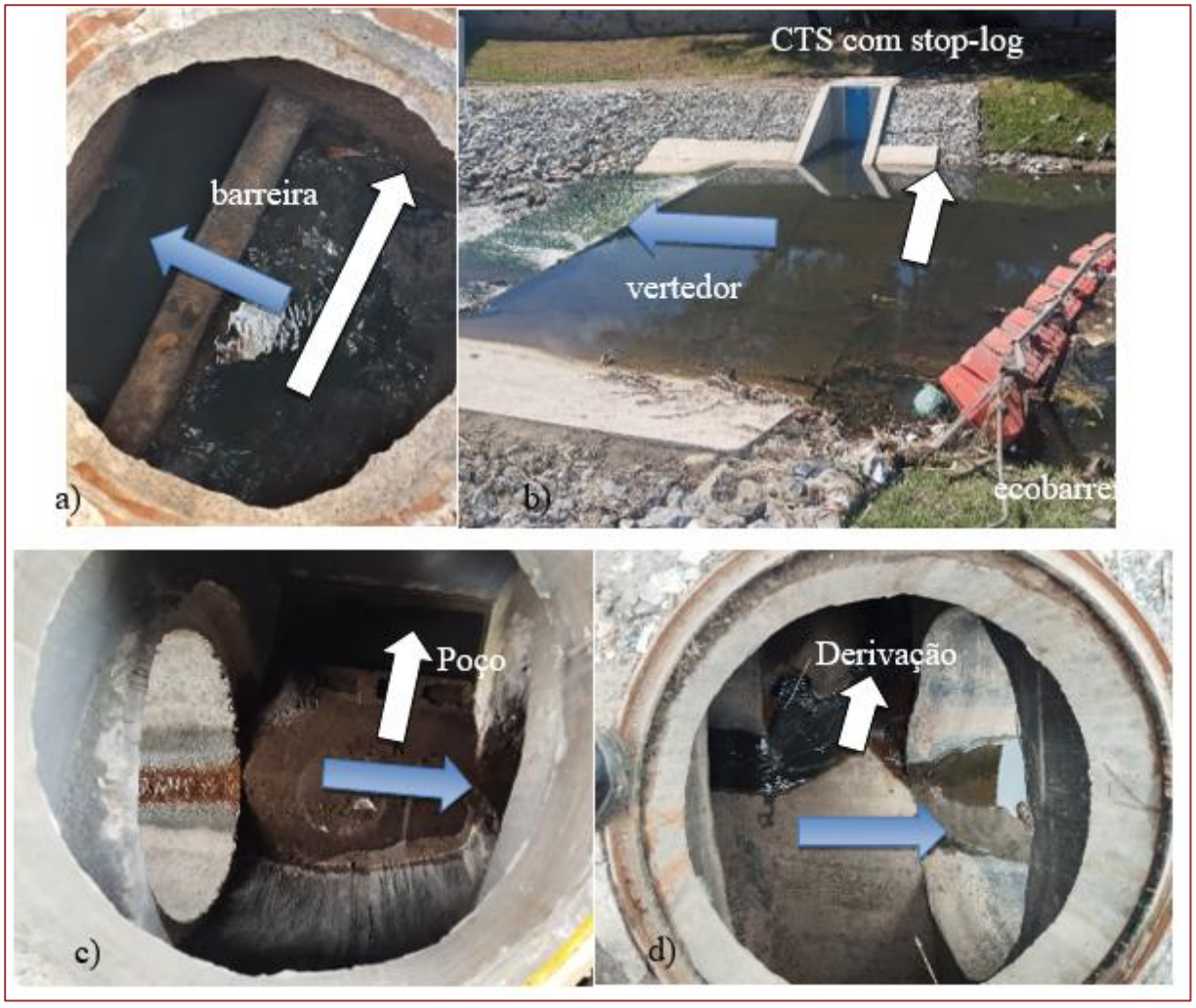
2. MATERIAL / METODOLOGIA

A abordagem utilizada neste trabalho é qualitativa, analisando a literatura técnica, a legislação pertinente (Lei 14.026, Constituição do Estado do RJ etc.), as informações do SNIS (SNIS, 2025), a Instrução Normativa Nº134 (AGENERSA, 2025), normas técnicas inerentes, tais como a Nbr 12207 (ABNT, 2016) e o projeto de Norma ABNT Nbr 17253 (ABNT, 2025), além de contratos de concessão (AGENERSA, 2025b) e relatórios de fiscalização em processos públicos que tramitam na AGENERSA (2025c).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Existem dois tipos principais de dispositivos ou estruturas CTS: barramento ou vertedor de soleira; e derivação afogada. O primeiro tipo instala uma barreira na GAP (Figura 3a) ou no corpo hídrico (CTS fluvial na Figura 3b) que desvia em tempo seco os esgotos irregulares ou a descarga de um curso d'água com contribuição de esgotos (a vazão ecológica deve ser mantida a jusante). O segundo tipo desvia os esgotos por meio de um poço de visita mais profundo que intercepta a GAP (Figura 3c) ou de uma curva de derivação construída no fundo da GAP (Figura 3d). Em ambos os tipos, os esgotos brutos se direcionam para um interceptor de tempo seco e, a partir daí, para uma estação de tratamento de esgotos, ou via recalque de uma elevatória ou por gravidade pelo interceptor (também chamado de coletor em tempo seco em alguns contratos de concessão). O esgoto extravasa em período chuvoso, vertendo a barreira (vertedor) ou simplesmente segue a jusante, após fechamento de comporta, stop-log ou registro do CTS.

Figura 3-Tipos de dispositivo de captação em tempo seco (adaptado de AGENERSA, 2025c)



Observa-se que há sistemas de esgotamento sanitário no Estado do Rio Janeiro que utilizam CTSs, porém sem observar critérios técnicos adequados em sua concepção, além de que não possuir protocolos de manutenção e operação adequados para a minimização de impactos ao meio ambiente, principalmente após eventos de chuva. Portanto, é necessário o estabelecimento de regras a serem observadas para mitigar os danos associados ao despejo irregular de esgoto em GAPs.

Quanto aos critérios de projeto, a IN134 da AGENERSA (2025a) os apresentou para a aplicação em suas Reguladas, podendo servir de referência para outras Entidades Reguladoras Infranacionais, notadamente o seu item 4.5.4:

4.5.4 Coletores em Tempo Seco com Captações em Tempo Seco (CTS)

I. Os projetos hidráulicos e hidromecânicos não podem ser padronizados ou generalistas, devendo ser específicos para cada unidade CTS (Captação em Tempo Seco) projetada;

II. É obrigatória a instalação de dispositivo de retenção/remoção de areia (desarenador, caixa de areia ou poço de areia) e de resíduos sólidos grosseiros

(Gradeamento) nas unidades CTS (Captação em Tempo Seco);

III. No dimensionamento hidráulico dos CTSs (Coletores em Tempo Seco), devem-se utilizar os critérios presentes na Nbr 12207/2016 para Projeto de interceptores de esgoto sanitário, observando principalmente os seguintes parâmetros:
    a. Tensão trativa mínima de 1,5 Pa;
    b. Coeficiente de rugosidade de Manning de 0,013 ou superior.

IV. Os coletores em tempo seco devem ser projetados para interceptar em tempo seco os esgotos indevidamente presentes em galerias de águas pluviais (GAP);

V. Devem ser evitadas as interceptações em tempo seco direto em calhas de rios ou canais, entretanto, caso seja realmente necessário, é obrigatório apresentar:
    a. Licença ambiental do órgão competente e aprovação em resolução emitida pelo Comitê de Bacias Hidrográficas relativo ao corpo hídrico;
    b. Memorial justificativo, incluindo estudo das opções de interceptação direto na calha do curso d'água (ou canal) versus interceptores das GAPs ao longo do canal ou curso hídrico sem interceptação neste;
    c. Estudo hidrológico do corpo hídrico em questão, incluindo os estudos de inundação decorrente da interceptação ou barramento na calha do corpo hídrico captado;
    d. O cálculo das vazões interceptadas nas calhas dos cursos d'água considerando as vazões ecológicas, mínimas e máximas do corpo hídrico, definidas pelos Comitês de Bacias Hidrográficas e órgãos ambientais.

VI. Unidades de Tratamento de Rio (UTR) ou Estações de Tratamento de Águas Fluviais (ETAF) não são unidades de CTS porque são estações tratamento em tempo seco dentro da calha dos cursos d'água, portanto, não serão permitidas nos projetos de CTS.

Adicionalmente, o projeto de norma ABNT NBR 17253deve ser revisto tecnicamente em diversos pontos cruciais, sendo que 40 contribuições de melhorias foram apresentadas pelos autores deste trabalho durante a consulta pública (ABNT, 2025) que se encerrou em 20/10/2025. Destacam-se algumas destas contribuições adiante, que estão em consonância com a IN 134 e podem ser úteis para as demais concessões de saneamento do Brasil que utilizem a CTS:

1. ALTERAR item 3.2 – captação ou tomada em tempo seco: dispositivo acessório ou estrutura hidráulica provisória ou definitiva complementar aos demais elementos do sistema separador absoluto, com a finalidade de interceptar águas residuárias veiculadas indevidamente pelo sistema de drenagem pluvial, em períodos de tempo seco, e transferi-las para o sistema de esgotamento sanitário;
2. INCLUIR item 3.2.2 – tubulação de derivação: tubulação parte integrante da estrutura de captação em tempo seco que se conecta diretamente na singularidade (poço de visita etc.) da tubulação de interligação (interceptor de tempo seco);
3. INCLUIR item 3.2.3 - tubulação de interligação: canalização tipo interceptor de esgoto sanitário com contribuição de tempo seco, ou ainda, interceptor de tempo seco (coletor de tempo seco) cuja função precípua é receber e transportar as contribuições de tempo seco de águas residuárias veiculadas indevidamente pelo

sistema de drenagem pluvial, caracterizada ainda pela defasagem dessas contribuições, da qual resulta o amortecimento das vazões máximas;

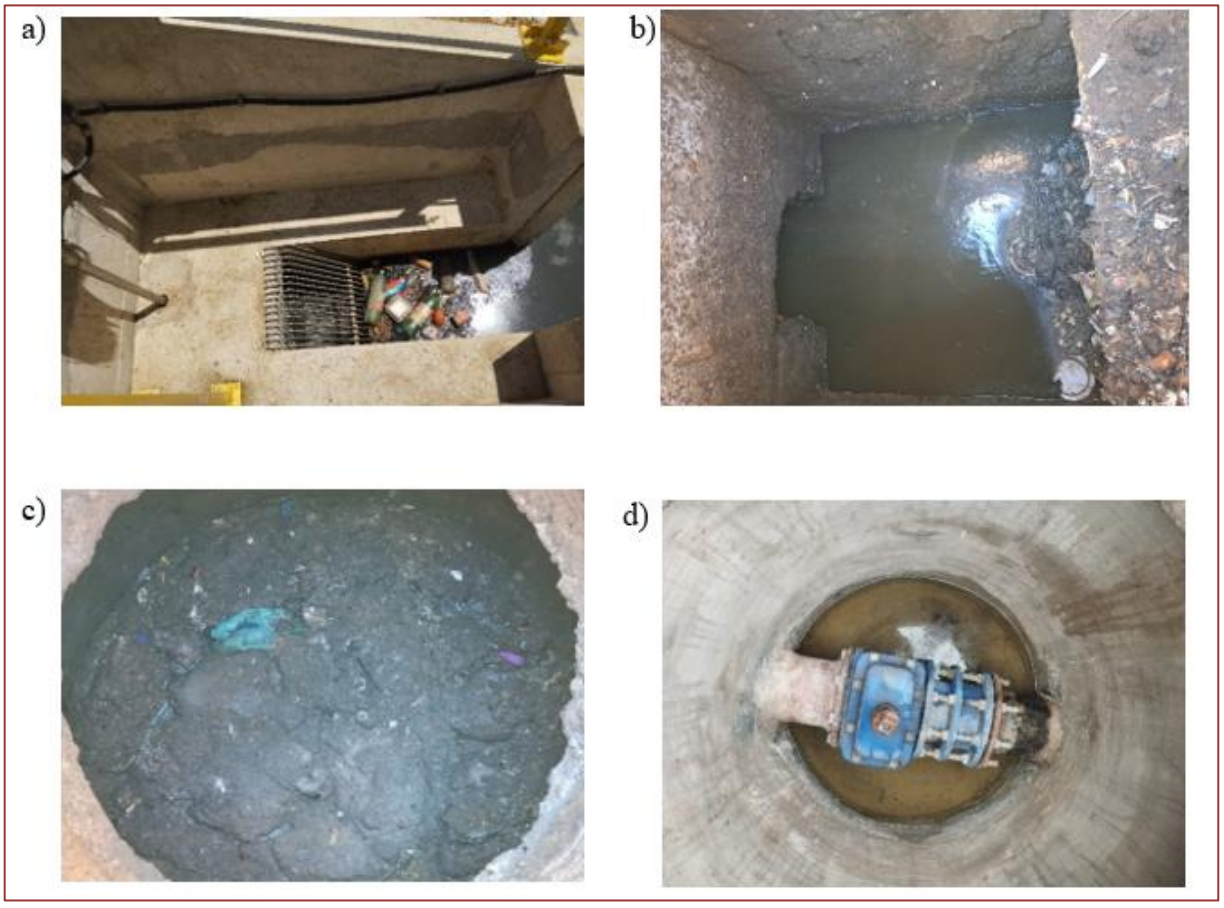
4. INCLUIR item 4.12 – Independentemente das razões quanto à veiculação irregular de águas residuárias pelo sistema de drenagem pluvial e do grau de cobertura de sistema separador absoluto, os responsáveis pela implantação, operação e manutenção das infraestruturas de esgotamento sanitário devem buscar contínuas melhorias para a correção da lógica e do adequado funcionamento do sistema separador, retirando do sistema de drenagem pluvial as contribuições indevidas de águas residuárias e visando sempre o aumento da cobertura e do atendimento pelo sistema tipo separador absoluto na bacia urbana;
5. ALTERAR item 6.1.7 – A captação em tempo seco NÃO pode prescindir do uso do sistema separador absoluto, porque deve ser concebida e projetada de forma que o tratamento das águas residuárias interceptadas pelo interceptor de tempo seco e seus órgãos complementares seja efetuado por meio de uma estação de tratamento de esgoto do sistema separador absoluto, existente ou projetada considerando também os impactos quantitativos e qualitativos das contribuições de tempo seco, de acordo com a legislação ambiental vigente e os planos diretores inerentes, visando sempre futura inativação das captações em tempo seco com o crescimento do atendimento pelo sistema separador absoluto, conforme rege a Lei do Saneamento;
6. ALTERAR item 6.3.1.8 - Nos casos em que a análise crítica da capacidade nominal do sistema separador absoluto a jusante não indicar a garantia de condições adequadas de funcionamento e de desempenho hidráulico-sanitário em tempo seco, incluídas as contribuições permanentes do item 6.3.1.5, deve ser implantada a tubulação de interligação (interceptor de tempo seco) na unidade mais próxima do sistema separador absoluto a jusante que comporte o sistema interceptor de tempo seco, requalificando o sistema existente ou implantando outra unidade, se necessário (Elevatórias, recalques, estação de tratamento etc.). Não é admitido em hipótese alguma prejudicar as condições hidráulicas adequadas do sistema separador absoluto, seja existente ou projetado;
7. ALTERAR item 6.3.1.9 - O extravasamento de vazões que excedam a capacidade nominal do sistema separador absoluto somente será permitido em períodos chuvosos, jamais em tempo seco, e pode ser efetuado por meio de singularidades hidráulicas, do tipo vertedores ou bocais, entre outros. Esses dispositivos de extravazão devem ser instalados obrigatoriamente em unidades de tempo seco, ou seja, na estrutura de captação a montante do dispositivo de supressão em período chuvoso, preferencialmente, e/ou nas singularidades do interceptor de tempo seco (conforme item 5 da norma NBR 12207), não sendo permitidas extravasões no sistema separador absoluto a jusante, para não prejudicar o funcionamento hidráulico-sanitário deste;
8. INCLUIR item 6.3.1.10 - Deve ser previsto um dispositivo para permitir a supressão temporária ou definitiva da contribuição de tempo seco das águas residuárias, que terá também a função de cessar temporariamente a contribuição em períodos chuvosos, tal qual previsto no item 5.7.2 da norma NBR 12207. Esse dispositivo (válvula, registro, comporta etc.) deve ser instalado na estrutura de captação em tempo seco, preferencialmente;

9. ALTERAR Item 6.3.2.1 – As tubulações de derivação e de interligação entre a estrutura de captação em tempo seco e o sistema separador absoluto a jusante existente ou projetado devem ser dimensionadas para a vazão de projeto, para escoamento em superfície livre, de acordo com as regras, os critérios e parâmetros usuais de dimensionamento de interceptores com contribuição de tempo seco, atendendo-se integralmente ao descrito na norma ABNT NBR 12207, principalmente ao item 4.2.3.3 desta norma;
10. INCLUIR item 6.3.3.8 - Recomendam-se campanhas de coleta e análise das águas residuárias a serem interceptadas pela captação em tempo seco, para quantificação e qualificação do tipo de afluente (DBO5 a 20°C, Sólidos em Suspensão, metais pesados etc.), porque influencia tanto na hidráulica dos interceptores e do sistema separador absoluto quanto nas características do tratamento do esgoto sanitário;
11. INCLUIR item 6.3.3.9 - Recomenda-se a instalação definitiva de dispositivos de medição de vazão (item 6.3.1.2) com sensores para medição contínua das águas residuárias interceptadas e extravasadas (item 6.3.1.9) e, assim, auxiliar no cálculo da eficiência da captação em tempo seco e sua vida útil correspondente;
12. ALTERAR item 6.4.1 - A concepção e o projeto das estruturas hidráulicas de transporte das águas residuárias em tempo seco podem ser baseados no entendimento de que estes mesmos elementos compõem, provisoriamente ou complementarmente, o sistema separador absoluto, quando este for integralmente implantado. A opção pela implantação de interceptores no interior de calhas fluviais deve ser evitada, entretanto, caso seja realmente necessária, deve ser justificada e embasada por estudos hidrológicos e hidráulicos que objetivem a verificação quanto ao não comprometimento do escoamento hidráulico do curso d'água e da respectiva bacia de drenagem, incluindo estudo das opções de interceptação direto na calha fluvial versus interceptores das galerias de drenagem pluvial ao longo do canal ou curso hídrico sem interceptação neste;
13. ALTERAR item 6.4.2 – O possível aumento da vazão interceptada durante períodos chuvosos, quando da ausência de fechamento do dispositivo na captação em tempo seco, pode impor modificações na qualidade do esgoto sanitário e variações da carga hidráulica e carga orgânica de afluentes para a estação de tratamento de esgotos. Nessas situações, a operação das unidades que compõem o processo de tratamento de esgotos deve ser ajustada e adaptada de forma a garantir a conformidade da qualidade do efluente final tratado em relação aos padrões de lançamento estabelecidos na legislação ambiental, considerando ainda que as águas residuárias possam conter elementos poluentes diversos do esgoto sanitário. Portanto, dependendo da qualidade do afluente (item 6.3.3.8), a estação de tratamento deverá atender a mais parâmetros de lançamento de efluentes do que os previstos para somente esgoto sanitário.

Quanto aos protocolos de manutenção e operação (OPEX),cabe a criação da Instrução Normativa (IN) que atenda a essa necessidade, a fim de evitar os extravasamentos em períodos de tempo seco por falhas operacionais, tais como: ausência de limpeza periódica de equipamentos (grades, caixas ou poços de areia) para remoção de resíduos sólidos (Figura 4a) e de sedimentos, areias e pedregulhos (Figura 4b), muito mais presentes em CTSs do que em sistema separador absoluto; não sucção de óleos, graxas e gordura em poços com fluxos praticamente estagnados (Figura 4c); e dispositivos de fechamento

falhos ou inoperantes (registros ou comportas) que abrem ou fecham inadequadamente (Figura 4d), permitindo esgotos com a presença de mais água de chuva (esgotos com ainda menores concentrações de DBO e de sólidos em suspensão - SST) ou vazão menor de esgotos em tempo seco.

Figura 4-Problemas operacionais por falhas de projeto e/ou ausência de rotina operacional



Nesse sentido, a sequência normal de fluxo de esgotos no CTS, de montante para jusante, deveria ser: tomada (Figura 3), gradeamento grosseiro com limpeza manual (Figura 4a); caixa ou poço de areia (Figura 4b); fechamento (Figura 4d); tubo de derivação; e interceptor de tempo seco. Sugeriu-se, então, os seguintes protocolos para compor a IN de OPEX:

1. Manutenção em trechos da GAP onde há rede separadora:

1.1 A prestadora do serviço deve realizar a transferência das eventuais ligações de esgoto na GAP para a rede de esgoto;

1.2 O poder municipal deve realizar a verificação da rede de drenagem para retirar ligações remanescentes.

2. Manutenção da GAP em trechos onde não há rede separadora:

2.1 A prestadora do serviço deve realizar a limpeza da GAP, verificando em todos as

caixas e poços disponíveis nos trechos compreendidos entre as ligações de esgoto e as estruturas de captação de tempo seco;

2.2 Inicialmente a limpeza deve ocorrer no máximo a cada 30dias, cabendo à prestadora a adequação para o prazo inferior, em função das condições observadas, buscando evitar acúmulos que produzam odores fétidos e proliferação de vetores e que afoguem as redes;

2.3 O material retirado deve ser transportado conforme legislação ambiental para local licenciado devidamente para tal.

3. Manutenção da CTS:

3.1 A prestadora do serviço deve realizar a limpeza periódica das estruturas de CTS, incluindo o dispositivo de retenção/remoção de areia (desarenador, caixa de areia ou poço de areia) e de resíduos sólidos grosseiros (Gradeamento), e o PV na interligação com o interceptor;

3.2 Inicialmente a limpeza deve ocorrer no máximo a cada 7 dias, cabendo à prestadora a adequação para o prazo inferior, em função das condições observadas, buscando evitar acúmulos que interfiram no funcionamento da estrutura, tanto a montante quanto a jusante (rede);

3.3 Nas operações de limpeza, devem ser observadas as condições das estruturas, para avaliar a necessidade de recuperação;

3.4 O material retirado deve ser transportado conforme legislação ambiental para local licenciado devidamente para tal.

4. Operação da CTS em ocorrência de chuva:

4.1 Devem ser definidos os parâmetros pluviométricos (bem próximos do tempo seco, impreterivelmente) para definir o momento de interrupção da captação do esgoto, para evitar a diluição do efluente, e a retomada da captação;

4.2 A estrutura de CTS deve contar com dispositivo remotamente controlado para impedir o fluxo das águas pluviais para o interceptor;

4.3 As interrupções ocorridas devem ser registradas, informando a duração das ocorrências e as vazões extravasadas (estimadas ou medidas);

4.4 Após a retomada da captação, deve haver a limpeza da estrutura de extravasão, se existente.

As ETEs que recebem CTSs devem tratar esgotos com características bem diferentes do doméstico: baixas DBO e SST (<100 mg/l, principalmente com CTSs fluviais), poluentes difusos, entre outras (PRODANOFF, 2005; Coelho, 2022; AGENERSA, 2025c). Isso veda o uso do UASB, p. ex.

Cabe esclarecer que as metas para substituição pelo separador absoluto do sistema disfuncional (CTS), equivocamente chamado de sistema unitário (ABNT, 2025; Coelho, 2022), devem ser definidas pela entidade reguladora infranacional (agência reguladora) e estarem estabelecidas nos contratos de concessão, conforme ocorreu nos blocos de concessão da CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos) no Estado do Rio de Janeiro (AGENERSA, 2025b). Nesses contratos regulados pela AGENERSA (2025b), definiram-se 5 anos para implantação de CTS e, para o sistema separador absoluto, a ampliação da cobertura e atendimento até atingir 90% em 2033, conforme rege a Lei

Federal 14026 (Brasil, 2020). Então, as coberturas por CTSs devem ser substituídas integralmente por separador absoluto até 2033, logo, a implantação de CTSs não deve se estender após 2033.

A mesma diretriz deve valer para aditivos em contratos de concessão existentes, onde o prazo para substituição por separador absoluto deve estar claramente estabelecido, incluindo a análise de impactos regulatórios, onde deve ser mantida a sustentabilidade financeira do contrato com a modicidade tarifária, podendo se valer de parceria com os titulares dos serviços (Municípios), que são os responsáveis legais pela universalização do esgotamento sanitário.

Caso não se consiga a sustentabilidade com modicidade, mesmo com parcerias, jamais deve ser demovida a meta de atingimento de 90% de cobertura e atendimento por esgotamento sanitário tipo separador absoluto até 2033, pois é mais acertado contratar uma concessão do sistema cuja sustentabilidade possa também ser regionalizada, para o cumprimento das metas legais, tal qual acontece nos blocos de concessão da CEDAE (modelo “filé e osso” em AGENERSA, 2025b).

Cabe ainda destacar que a concessionária deve manter o titular sabedor dos serviços necessários para atingir as metas de cobertura e atendimento em 2033, incluindo o acompanhamento do cronograma.

4. CONCLUSÃO

A jornada rumo à universalização do saneamento básico no Brasil, conforme estabelecido pelo Novo Marco Legal, apresenta-se como um desafio complexo, mas imperativo. A realidade atual, marcada pelo baixo índice de atendimento e pela disfuncionalidade de esgotos em galerias pluviais, exige uma transformação profunda e coordenada. A meta de alcançar 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até 2033 não é apenas um objetivo numérico, mas um compromisso fundamental com a saúde pública, a qualidade ambiental e o desenvolvimento socioeconômico do país (Calvet e Coelho, 2025). Por conseguinte, a prestação do serviço de esgotamento sanitário deve ser desenvolvida “de forma adequada à saúde pública, à conservação dos recursos naturais e à proteção do meio ambiente” (Brasil,2020), considerando os princípios fundamentais de segurança, qualidade, regularidade e continuidade.

Nesse cenário, a efetividade das Captações de Tempo Seco (CTSs), observando critérios técnicos nos projetos, como os apresentados na IN 134, e a implementação de rigorosos protocolos de manutenção e operação tornam-se cruciais tanto na fase de transição do sistema "unitário" para o separador absoluto, quanto para a proteção contínua dos corpos hídricos contra ligações irregulares e em áreas com restrições. Contudo, o sucesso dessas intervenções depende diretamente de uma regulação robusta e proativa, capaz de monitorar o cumprimento das metas, exigir a substituição progressiva por sistemas separadores até 2033 e garantir a eficiência das operadoras.

REFERÊNCIAS

[1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma ABNT NBR 12207 - Projeto de Interceptores de esgoto sanitário**. 1ª ed. Abr/1992.

[2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma ABNT NBR 12207 - Projeto de Interceptores de esgoto sanitário**. 2ª ed. 13/6/2016.

[3] ABNT. Consulta Nacional. **Projeto ABNT NBR 17253 - Projeto de estruturas de captação de águas residuárias em sistemas de drenagem pluvial em período de tempo seco**. Disponível em: https://www.abntonline.com.br/consultanacional/pdfview/viewer.aspx?Q=LzZ5ck43RjV2L3pVYlkyUGMyNk5pUT09. Acesso em 20/10/2025.

[4] AGENERSA - Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro. **Instrução Normativa IN 116 - dispõe sobre os procedimentos para uniformização das regras para entrega de projetos executivos pelas concessionárias de saneamento**. 06/3/2024. Disponível em:https://www.rj.gov.br/agenersa/sites/default/files/arquivos_paginas_basicas/IN116_1.pdf.

[5] AGENERSA - Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro. **Instrução Normativa IN 134 - dispõe sobre os procedimentos para uniformização das regras para entrega de projetos executivos pelas concessionárias de saneamento**. 27/3/2025. 2025a. Disponível em: https://www.rj.gov.br/agenersa/sites/default/files/arquivos_paginas_basicas/IN134.pdf. Acesso em: 25 de junho de 2025.

[6] AGENERSA - Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro. **Contratos de Concessão e Documentos Associados**. 2025b. Disponível em: https://www.rj.gov.br/agenersa/contratos-de-concessao-e-documentos-associados. Acesso em: 29/10/2025.

[7] AGENERSA - Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro. **Relatórios de fiscalização CASAN**. 2025c. Disponível em: https://www.rj.gov.br/agenersa/relatorio-fiscalizacao-casan. Acesso em: 29/10/2025.

[8] ALERJ. **Constituição do Estado do Rio de Janeiro**. 1989. Atualizada até a Emenda 71 de 21 de dezembro de 2017. Disponível em: https://www2.alerj.rj.gov.br/biblioteca/assets/documentos/pdf/constituicoes/rio_de_janeiro/constituicao_1989/Constituicao_1989.pdf. Acesso em 28/10/2025.

[9] ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução ANA Nº 192, de 8 de maio de 2024 que aprova a Norma de Referência NR nº 8/2024, que dispõe sobre metas progressivas de universalização de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, indicadores de acesso e sistema de avaliação. Brasil**. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2024/192. Acesso em: 2/7/2025.

[10] AZEVEDO NETTO, J.M. **Manual de Hidráulica**. Ed. Blucher, 2012.

[11] BRASIL. **Lei Federal Nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em 27/10/2025.

[12] CALVET, R. C.; COELHO, F. M. **Uso de captações de tempo seco rumo à universalização do esgotamento sanitário**. In: XIV Congresso Brasileiro de Regulação, 26 a 28/11/25, Rio de Janeiro, 2025.

[13] COELHO, F. M. **Coletor Sanitário: nova metodologia de dimensionamento de coletores de esgoto**. Ed. Dialética, 332p., 2022.

[14] PRODANOFF, J. H. A. **Avaliação da Poluição Difusa Gerada por Enxurradas em Meio Urbano.** Tese D. Sc. Eng. Civil. COPPE/UFRJ,266p., 2005.

[15] SNIS. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Produtos do SNIS. Painel de Informações**. Brasil. Disponível em: https://appsnis.mdr.gov.br/indicadores-hmg/web/site/index.Acesso em: 25 de junho de 2025.

Capítulo 12

Rugosidade sob condições reais operacionais de coletores de esgotos

Frederico Menezes Coelho

Resumo: A metodologia de dimensionamento de sistemas coletores de esgotos sanitários utiliza a centenária fórmula de Manning para os cálculos hidráulicos em condutos livres, sendo que os critérios de rugosidade dos condutos apresentam valores fixos que geralmente não consideram a sinergia dos parâmetros físicos e hidráulicos em situações reais operacionais: biofilme, sedimentos e obstáculos. Portanto, esse trabalho analisa as normas e os critérios praticados para, então, modelar matematicamente 4.276 dados representativos da operação de esgotos ao redor do mundo, incluindo 312 dados primários obtidos em experimentos realizados no Simulador de Águas Urbanas da UFRJ e em sistemas existentes no Estado do Rio de Janeiro, com distintos diâmetros e materiais. Após análise estatística e validação do modelo proposto, uma metodologia com novos valores de rugosidade para critérios de projeto é apresentada para dimensionar hidraulicamente os coletores sanitários, considerando as condições de funcionamento real do sistema. Nesse caso, recomenda-se utilizar para início de plano uma rugosidade de Manning (n) igual a 0,013, sob condições operacionais mais favoráveis, e para final de plano n=0,015, sob condições reais operacionais, além de utilizar n=0,024 tanto para tubos internamente corrugados quanto para sistemas combinados de esgotos com sedimentos ou obstáculos.

Palavras-chave: Coeficiente de rugosidade, Fórmula de Manning, Coletor de esgotos, Parâmetros hidráulicos, Modelagem matemática.

1. INTRODUÇÃO

A maior dificuldade para projetar um sistema de esgotamento sanitário ou pluvial está na correta seleção do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning (n) nos cálculos hidráulicos, porque que não existe um método exato para essa seleção ainda (Chow, 1959), já que sua determinação é difícil, especialmente nos condutos não circulares, pois seu valor não é fisicamente exato nem é adimensional, de acordo com Chow (1959), além de variar com a geometria e com o revestimento interno do material dos tubos ou canais (Danieletto, 2007). Ademais, devido a análise dimensional, o próprio autor da fórmula submeteu em seus artigos (Manning, 1891) outra fórmula dimensionalmente homogênea – condição necessária para comprovação física de uma equação teórica.

Diante de tais premissas da variabilidade, é necessário rever o estado da arte dos estudos que estabeleceram os critérios de dimensionamento, as normas e os cálculos dos sistemas de transporte hidráulico de fluidos, mais especificamente, os valores recomendados para os coeficientes de rugosidade da fórmula de Manning em condutos de esgotos sanitários e pluviais, nos diversos materiais empregados ao redor do mundo. Cabe destacar que o estudo deve agregar o máximo de ensaios sob condições reais operacionais do escoamento hidráulico dos condutos por gravidade, isto é, coletores com anos de uso, contendo biofilme aderido, sedimentos e/ou obstáculos (assentamento irregular, pedras, blocos desmoronados etc.), porque influenciam sobremaneira a hidráulica do escoamento que ocorre na prática (Ackers *et al.*, 1961; ASCE, 1996; Horoshenkov *et al.*, 2004; Campisano *et al.*, 2013; Rahim, 2017; Carrera e La Motta, 2020).

2. OBJETIVOS

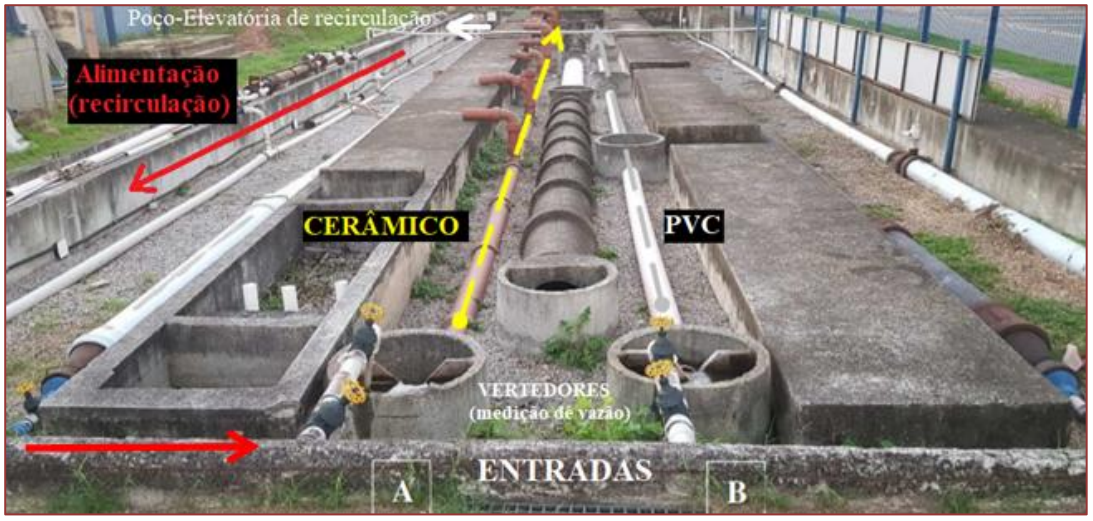
Portanto, este trabalho analisa os resultados de diversos ensaios de laboratório e de campo que visam determinar os coeficientes de rugosidade para os mais variados tipos, características e dimensões de coletores sanitários por gravidade, que transportam esgotos pluviais, sanitários, combinados ou, ainda, fluidos potáveis ou sintéticos que simulassem esgotos sanitários ou pluviais. Adicionalmente, foram executados ensaios no Simulador de Águas Urbanas (SAU) do Centro Experimental de Saneamento Ambiental (CESA) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em escala piloto (Figura 1), e em sistemas de esgotamento sanitário do Estado do Rio de Janeiro. Nesse caso, os dados primários e secundários obtidos foram modelados matematicamente em relação aos materiais, suas dimensões e aos parâmetros hidráulicos principais, tais como: velocidade, vazão, tensão trativa, lâmina d'água, declividade, entre outros. Enfim, objetiva-se comprovar a variação dos coeficientes de rugosidade com os parâmetros hidráulicos operacionais e com as características físicas dos condutos e propor novos critérios de projeto mais representativos dessa variabilidade do coeficiente de rugosidade em sistemas de coleta e transporte de esgotos sanitários por gravidade.

Vale ainda citar a abrangência e a qualidade desses dados com diversos elementos presentes em escoamento de esgotos sanitários e combinados sob condições operacionais reais, tais como: biofilme, sedimentos e obstáculos (juntas desalinhadas, assentamento irregular, dentre outros fatores comuns). Dados que foram também analisados estatisticamente, por parâmetros hidráulicos investigados e pelos parâmetros ou elementos presentes, a fim de verificar o critério de rugosidade para dimensionamento hidráulico.

3. METODOLOGIA

Primeiramente foi realizada ampla pesquisa bibliográfica sobre o assunto, focando na rugosidade de condutos sanitários ou pluviais ao longo do escoamento hidráulico. Depois, entre 2019 e 2020, foram executadas 10 campanhas de medições em escala piloto no SAU (vide detalhes do fluxo em circuito fechado na Figura 1) e 4 campanhas de medições no campo em sistemas de esgotamento sanitário do Estado do Rio de Janeiro, obtendo-se, assim, 292 dados com esgotos pluviais contendo sedimentos e matéria orgânica vegetal no SAU (materiais: cerâmico e PVC; DN150 e 200mm) e 20 dados de esgotos sanitários brutos no campo (materiais: PVC e concreto; DN150, 400, 500, 1000 e 1500mm). Esses ensaios trabalharam na seguinte faixa: diâmetros nominais (DN) de 150 a 1500mm, lâmina d'água relativa ao diâmetro interno do conduto (y/D) de 3,7 a 100% (até as condições de conduto forçado), declividade (S) de 0,00035 a 0,03597m/m, vazão do fluido (Q) de 0,06 a 281,71 l/s e velocidade do fluxo (v) de 0,07 a 4,64m/s.

Figura 1: Ensaios nas 2 linhas de tubos no SAU/UFRJ: A = linha MBV DN 150 e 200mm assente sobre solo e B = linha em PVC DN 150 e 200mm assente sobre o solo; destaque para registros de manobra e vertedores triangulares 90° nos poços de entrada (h_A=150mm e h_B=155mm)



Contudo, foram compilados 4.276 dados de rugosidade obtidos por 57 pesquisadores (incluindo o autor deste trabalho) entre os anos 1782 e 2020, sendo 3.592 dados de ensaios de laboratório ou escala piloto (L) e 684 dados de campo (C) em sistemas coletores implantados no Brasil, Argentina, Colômbia, Estados Unidos, Canadá, Egito, Indonésia, Índia, França, Hungria, Holanda, Suécia, Suíça, Itália, Escócia, Inglaterra, Reino Unido, dentre outros. Cabe ainda destacar que os ensaios foram realizados com os mais variados materiais (11 tipos), diâmetros internos (D de 32 a 6.767mm), declividades (S de 0,00003 a 0,1585m/m), vazões (Q de 0,05 a 6.793 l/s) e velocidades de fluxo (v de 0,02 a 5,44m/s), sendo os seguintes tipos de fluidos ensaiados: água bruta de rio, água potável, água pluvial, esgotos combinados (pluvial e sanitário) e esgotos sanitários, sendo sintéticos, brutos ou tratados, ou contendo biofilme aderido, sedimentos e/ou obstáculos.

Na sequência, os dados de rugosidade foram reunidos em tabelas, representados graficamente e correlacionados aos parâmetros hidráulicos principais, sendo: vazão,

velocidade, declividade, lâmina d'água, tensão trativa, diâmetro interno equivalente (D=4.R em seção plena) e número de Reynolds (R_e=4.v.R/υ). Nesse caso, a equação empírica de Manning foi utilizada para calcular o coeficiente de rugosidade de Manning (n) dos valores obtidos (equação 1), e converter os dados a partir de outros coeficientes, tais quais: altura k_s de Colebrook-White ($n=0{,}0381 \cdot k_s^{0,167}$, cf. Ackers *et al.*, 1961) e/ou f de Darcy da equação de Darcy-Weisbach (Ackers *et al.*, 1961), nas equações 2 e 3.

$$n=v^{-1}R^{2/3}S^{1/2} \qquad \text{equação (1)}$$

$$f^*= f^{0,5}=(8gRS/v^2)^{0,5} \qquad \text{equação (2)}$$

$$k_s=14{,}8R[10^{-1/(2f^*)}-2{,}51/(R_ef^*)] \qquad \text{equação (3)}$$

Sendo:v = velocidade (m/s);

R = raio hidráulico (m);

S = declividade da linha d'água ou declividade hidráulica (m/m);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

R_e = número de Reynolds (adimensional);

υ = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s);

k_s = altura de rugosidade por Colebrook-White (m);

f = fator de atrito de Darcy (adimensional);

n = coeficiente de rugosidade de Manning ($m^{-1/3}s$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As faixas com as médias e as medianas dos 4.276 valores de coeficientes de rugosidade de Manning (n) obtidos pelos pesquisadores nos ensaios, inclusive pelo autor do presente trabalho (AUTOR), estão presentes na Tabela 1 (ensaios somente do Autor) e na Tabela 2, por material. Ademais, a Figura 2 e a Figura 3 representam graficamente essas variações por pesquisador e por material, respectivamente.

Tabela 1: Variação dos coeficientes de Manning n obtidos pelo AUTOR por material do coletor

MATERIAL	Rugosidade n obtida			n≤0,010		0,010<n≤0,013		n>0,013	
	Mín.	Méd.	Máx.	Dados	%	Dados	%	Dados	%
Cerâmico[a]	0,0032	0,0105	0,0288	38	46,4%	22	26,8%	22	26,8%
Concreto[b]	0,0118	0,0235	0,0583	0	0%	3	18,8%	13	81,2%
PVC[a]	0,0020	0,0141	0,0374	66	31,4%	31	14,8%	113	53,8%
PVC[b]	0,0264	0,0534	0,0737	0	0%	0	0%	4	100,0%
GERAL[c]	**0,0020**	**0,0142**	**0,0737**	**104**	**33,3%**	**56**	**18,0%**	**152**	**48,7%**

Notas:
[a] Resultados dos ensaios executados no Simulador de Águas Urbanas (SAU) da UFRJ;
[b] Resultados dos ensaios executados no campo em sistemas de esgotamento sanitário no RJ;
[c] Variação dos 312 valores obtidos pelo AUTOR nos ensaios realizados no SAU e no campo.

Cabe destacar que o Autor obteve uma média geral para o valor de rugosidade de Manning $n_{méd}$=0,0142 em seus ensaios, sendo que 49% dos resultados foram superiores a 0,013 e 67% acima de 0,010. Em relação a cada material, foram os seguintes valores médios de rugosidade: cerâmico com $n_{méd}$=0,0105 no SAU; PVC com $n_{méd}$=0,0141 no SAU e $n_{méd}$=0,0534 no campo; e concreto com $n_{méd}$=0,0235 no campo, de acordo com a Tabela 1, que apresenta somente as faixas dos 312 resultados obtidos pelos autor deste trabalho (Autor).

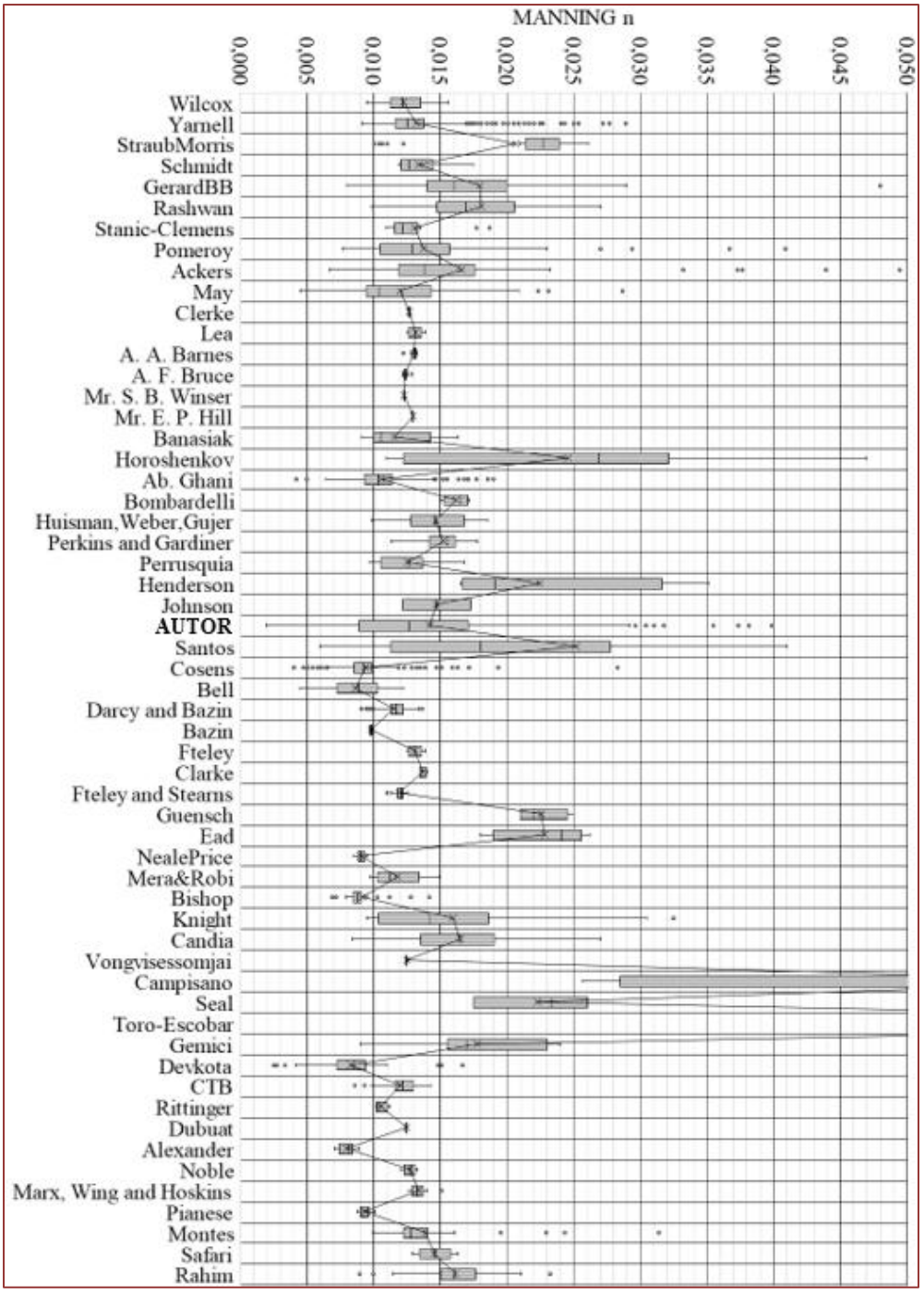
Tabela 2: Variação dos coeficientes de Manning n na amostragem geral por material do coletor

MATERIAL	Rugosidade n obtida			n≤0,010		0,010<n≤0,013		n>0,013	
	Mín.	Méd.	Máx.	Dados	%	Dados	%	Dados	%
Aço	0,0098	0,0164	0,0206	1	1,3%	17	22,4%	58	76,3%
Acrílico	0,0088	0,0139	0,0314	21	18,8%	30	26,8%	61	54,4%
Alvenaria de tijolos	0,0097	0,0139	0,0495	1	1,0%	69	71,1%	27	27,9%
Cerâmico	0,0032	0,0124	0,2200	224	23,6%	466	49,2%	258	27,2%
Cimento-Amianto	0,0048	0,0107	0,0409	192	60,0%	73	22,8%	55	17,2%
Concreto	0,0042	0,0140	0,0715	108	9,9%	464	42,3%	524	47,8%
Ferro Fundido	0,0047	0,0083	0,0117	20	83,3%	4	16,7%	0	0%
Madeira	0,0071	0,0116	0,0151	19	10,5%	145	80,6%	16	8,9%
Metal Corrugado (CMP)	0,0180	0,0232	0,0263	0	0%	0	0%	80	100%
PEAD	0,0025	0,0103	0,0240	116	70,3%	20	12,1%	29	17,6%
PVC	0,0020	0,0132	0,1567	422	35,8%	425	36,1%	331	28,1%
GERAL	**0,0020**	**0,0131**	**0,2200**	**1.124**	**26,3%**	**1.713**	**40,0%**	**1.439**	**33,7%**

Nota:
Resultados com base nos dados extraídos da literatura e do autor deste trabalho, sendo a seguinte sequência de referências, de acordo com a ordem de pesquisadores na Figura 2:
MANGIN (2010); YARNELL e WOODWARD (1920); STRAUB e MORRIS (1951); SCHMIDT (1959); GERARD *et al.* (1989); MEKY *et al.* (2015); STANIĆ *et al.* (2016); POMEROY (1967); ACKERS *et al.* (1964) e PERRUSQUÍA *et al.* (1986); MAY (1993) e PERRUSQUÍA *et al.* (1986); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BANASIAK e VERHOEVEN (2008); HOROSHENKOV *et al.* (2004); AB. GHANI (1993); BOMBARDELLI e GARCÍA (2003); HUISMAN *et al.* (2004); PERKINS e GARDINER (1985); PERRUSQUÍA *et al.* (1986); PERRUSQUÍA *et al.* (1986); PERRUSQUÍA *et al.* (1986); presente trabalho; SANTOS *et al.* (2005); COSENS (1954); BLOODGOOD e BELL (1961); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); GUENSCH *et al.* (2004); EAD *et al.* (2000); NEALE e PRICE (1964); MERA e ROBI (2013); BISHOP (1978); KNIGHT e STERLING (2000); CANDIA (2005); VONGVISESSOMJAI *et al.* (2010); CAMPISANO *et al.* (2013); SEAL *et al.* (1997); TORO-ESCOBAR *et al.* (2000); GEMICI *et al.* (2017); DEVKOTA (2012); MANGIN (2010); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); BARNES (1916); PIANESE e DELLA MORTE (2004); MONTES *et al.* (2020) ; SAFARI *et al.* (2017); RAHIM (2017).

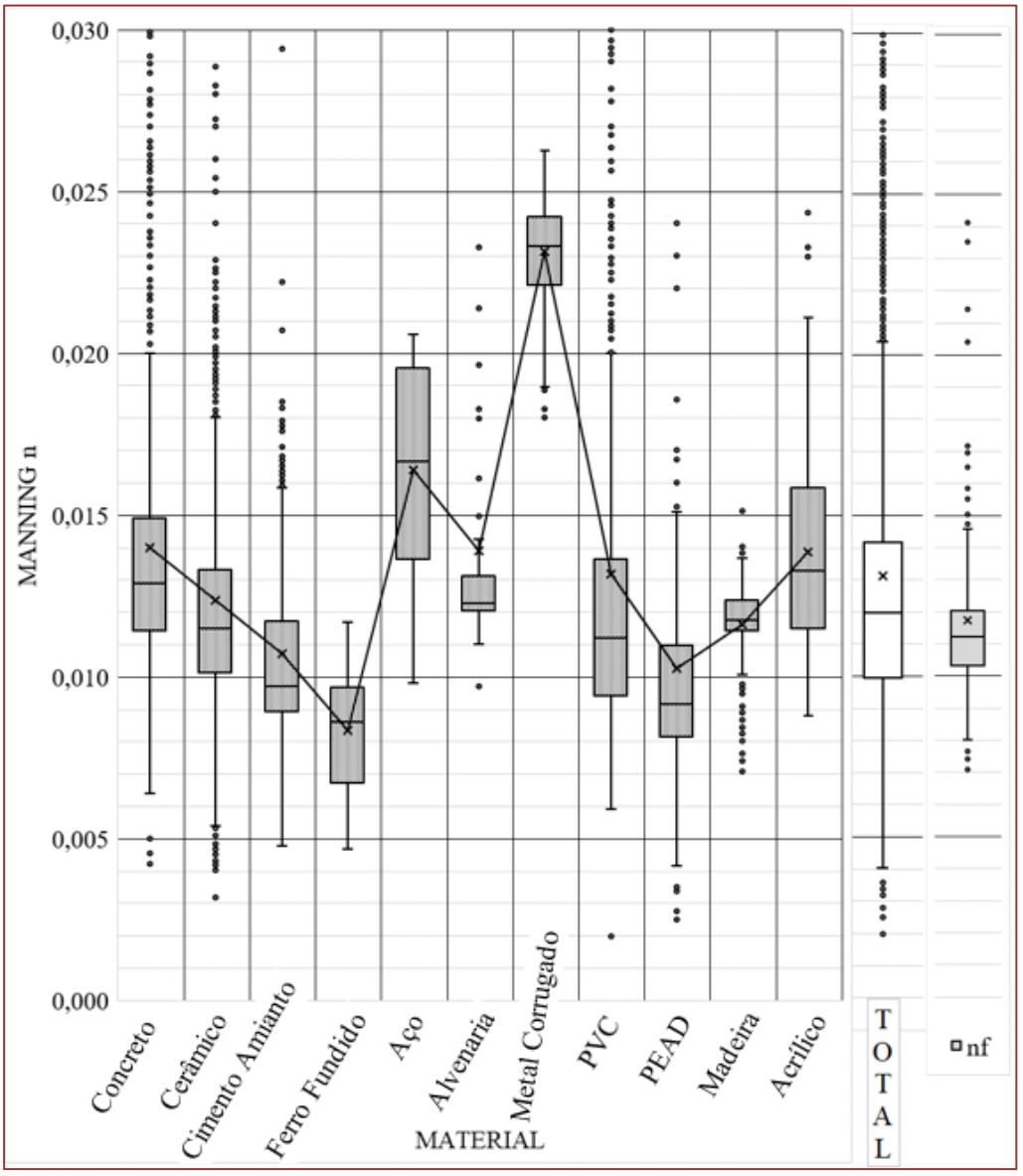
Em determinados ensaios, alguns pesquisadores executaram os testes hidráulicos sob regime de escoamento com o conduto forçado (sob pressão y para y/D≥100%) e com seção plena de fluido (y/D=100%), incluindo alguns experimentos realizados pelo autor deste trabalho. Nesse caso, os valores de rugosidade de Manning para fluxo com seção plena de fluido (n_f) variou entre 0,0071 e 0,0328, sendo que a média foi 0,0117, de acordo com a Figura 3. Além disso, a Figura 4 apresenta a influência da variação da lâmina d'água relativa ao diâmetro interno (y/D) tanto na rugosidade de Manning (n) do conduto em seções parcialmente preenchidas quanto na rugosidade relativa de Manning entre seções de preenchimento parcial e pleno de fluido (n/n_f).

Figura 2: Rugosidade (n) por pesquisadores, incluindo do autor deste trabalho (Autor)



Dentre os parâmetros hidráulicos avaliados, a velocidade do fluxo possui uma tendência curvilínea de redução com a rugosidade interna do conduto e vice-versa. Dessa forma, a Figura 5 (gráfico tipo mono- log) apresenta a influência da rugosidade de Manning (n) na velocidade do fluido obtida nos ensaios, por tipo de material empregado em coletores de esgotos. Analogamente, a Figura 6 mostra apenas os resultados da variação da velocidade com a rugosidade (n) que é devida às camadas aderidas de biofilme (limo ou zoogleia) no interior dos condutos, sendo 412 valores dos 4.276 resultados obtidos, ou seja, cerca de 10% do total.

Figura 3: Rugosidade (n) por material, inclusive a faixa obtida para a rugosidade de Manning nos casos de fluxo com seção plena de fluido (n_f)



Por outro lado, a Figura 4 apresenta os efeitos da rugosidade na velocidade do fluido devido à presença de obstáculos dentro dos condutos, que representam 330 dados, ou seja, cerca de 8% do total. Nesse caso, obstáculos são os elementos presentes no interior dos coletores de esgotos que retardam o movimento do fluido de forma permanente ou transitória, tais como: declividades irregulares, juntas desalinhadas, resíduos sólidos sedimentados, lodo depositado, placas de gordura solidificadas; tijolos ou blocos (pedaços) oriundos de desmoronamentos e deslocamentos do material do coletor e das singularidades (poços de vista, por ex.), pedras e outros elementos provenientes da poluição difusa inerente aos sistemas combinados e de tempo seco. Exclui-se, então, os efeitos dos sedimentos (areia, por ex.) presentes nos esgotos, que serão estudados de forma separada, por serem considerados também nos valores de projeto e de normas para a autolimpeza dos coletores de esgotos, tais como, velocidades mínimas ou tensões trativas mínimas.

Figura 4: Rugosidade relativa (n/n_f) e a lâmina d´água relativa (y/D) por tipo de material, incluindo os valores de rugosidade relativa quando a seção é plena ($n/n_f=1$) e está sob conduto forçado ($y/D\geq1$); e Rugosidade (n) e lâmina d´água relativa (y/D) por material

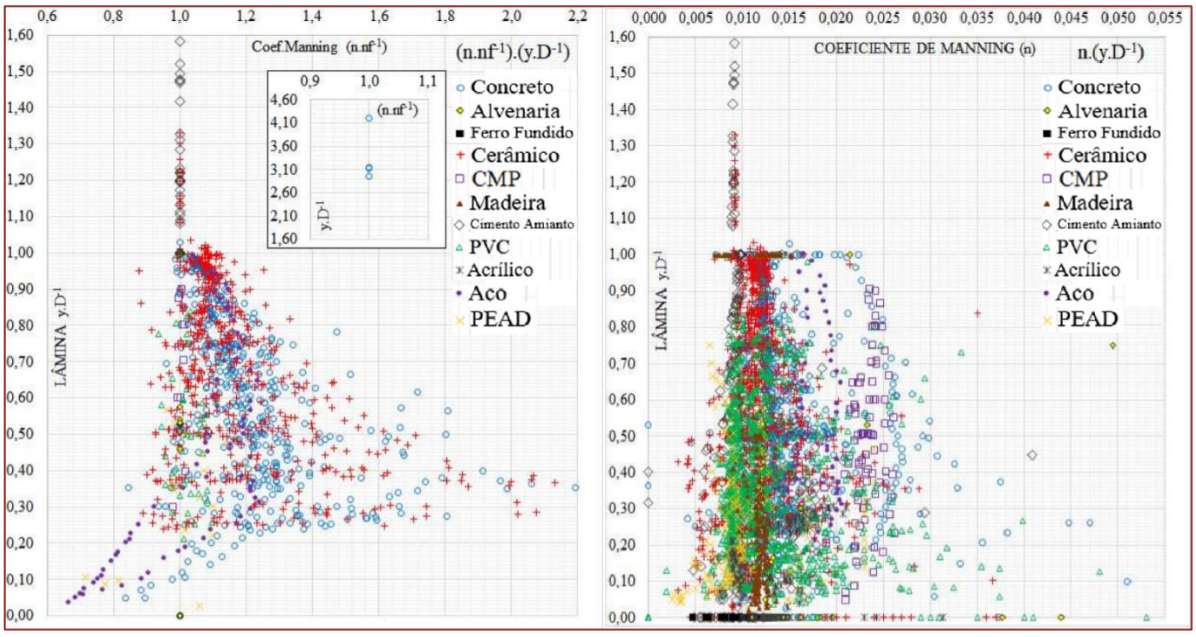
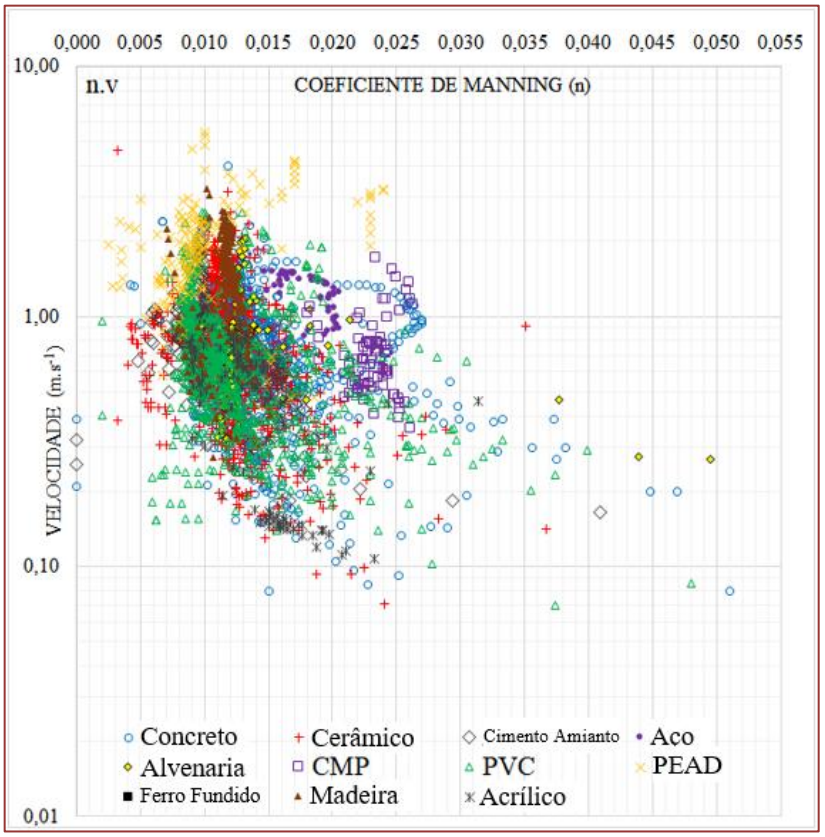


Figura 5: Rugosidade (n) na velocidade de fluxo, por material do conduto



Alguns testes tiveram os efeitos sinérgicos entre biofilme aderido, obstáculos e sedimentos, casos de Toro-Escobar *et al.* (2000) e Campisano *et al.* (2013) para sedimentos e obstáculos, e do próprio Autor para biofilme, sedimentos e declividade irregular, que geraram os maiores valores (n), cf. Figura 7 e Tabela 1.

Figura 6: Rugosidade (n) na velocidade, considerando somente os resultados contendo biofilme aderido no interior dos condutos, por material e por pesquisadores

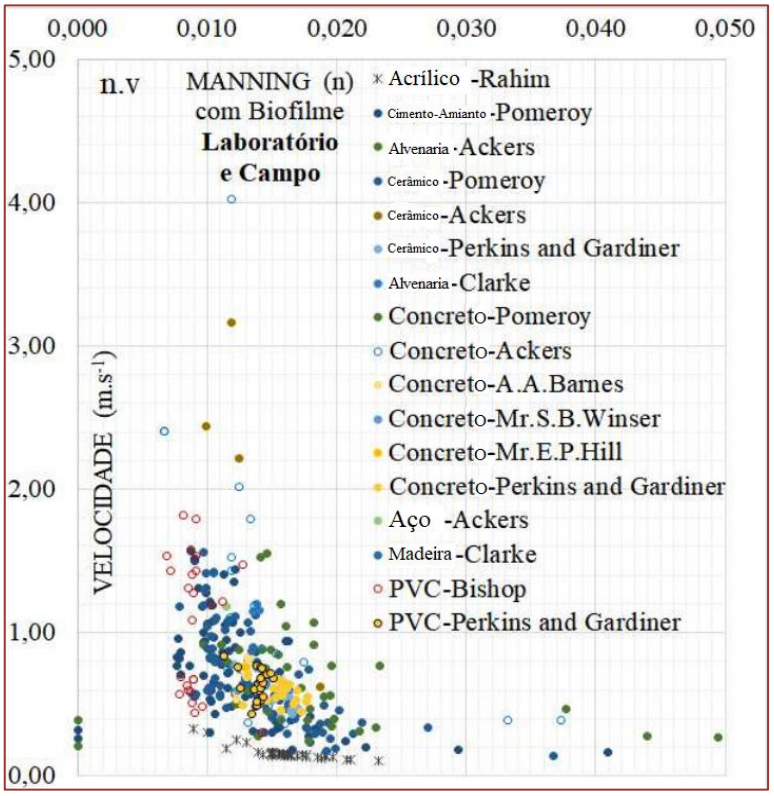
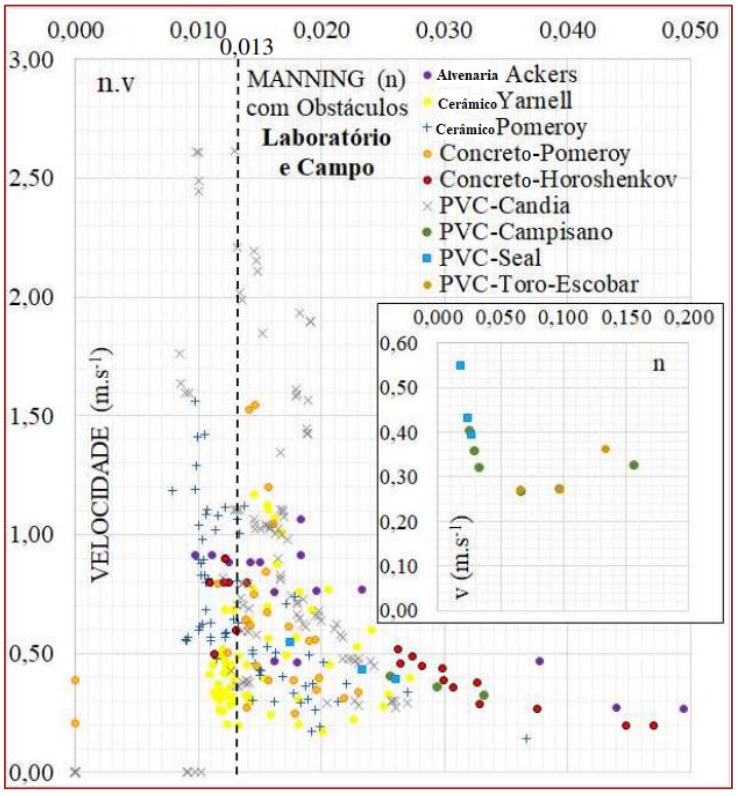
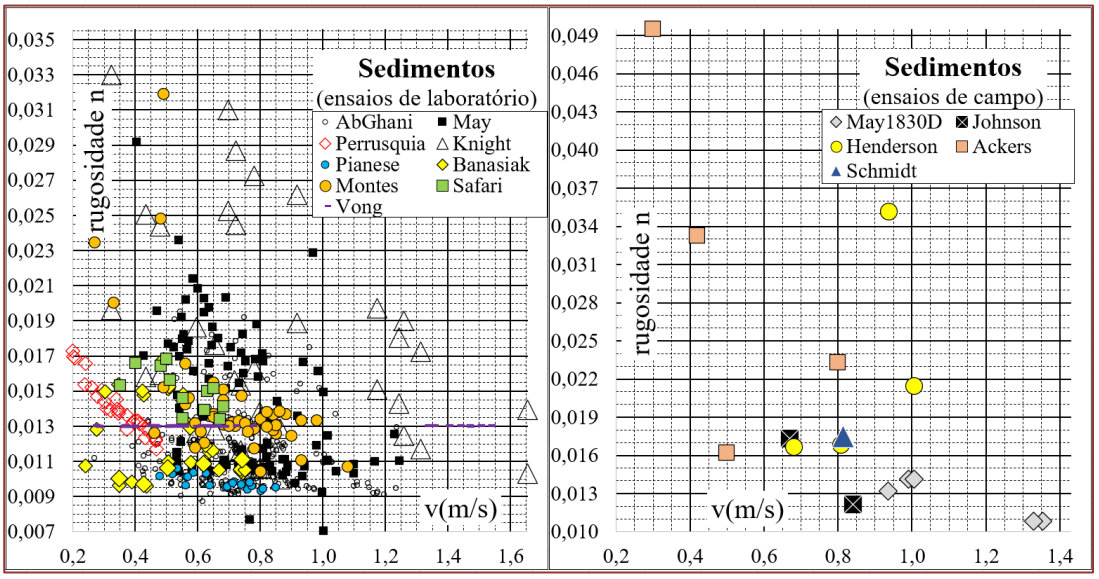


Figura 7: Rugosidade (n) na velocidade, considerando somente os resultados contendo obstáculos no interior dos condutos, por material e por pesquisadores



Os impactos na rugosidade de Manning (n) pelos efeitos do transporte de sedimentos e seus depósitos ao longo dos coletores sanitários, bem como sua influência na velocidade de fluxo hidráulico, estão apresentados na Figura 8 , que contém 658 resultados obtidos (15% do total) em laboratório e em campo pelos pesquisadores.

Figura 8: Rugosidade (n) na velocidade, considerando somente os resultados de ensaios com sedimentos no interior dos condutos, por pesquisadores



A partir dos resultados, verificou-se que o valor da rugosidade de Manning (n) aumenta muito na presença dos elementos reais operacionais, tais como: biofilme formado em poucas semanas de operação etc., e que os valores são acima do atualmente praticado e normatizado (n=0,013 geral e n=0,010 para PVC). Nesse caso, os valores abaixo de 0,013 analisados quase sempre ocorreram somente em condições operacionais favoráveis (condutos novos, limpos, laboratoriais, bem assentes etc.). Ao comparar os resultados médios ($n_{méd}$ da Tabela 1 e da Tabela 2) com os coeficientes de Manning (n) usuais em projetos (n_{proj} da Tabela 3), se verificam valores muito maiores nos tubos dito lisos acrílico e PVC. Nesse caso, porque muitos ensaios de laboratório ou em escala piloto simulavam as condições reais operacionais com biofilme aderido (em acrílico por RAHIM, 2017, p.ex.) e/ou sedimentos (em PVC por Campisano *et al.*, 2013, p.ex.) e/ou obstáculos (Horoshenkov *et al.*, 2004, p.ex.), ou com sinergia entre estes elementos (em PVC pelo Autor, p.ex.).

Tabela 3: Resultados médios obtidos ($n_{méd}$) versus os usuais em projetos de esgotos (n_{proj})

MATERIAL DO CONDUTO	n_{proj}	$n_{méd}$	Diferença[1]
Aço	0,0110	0,0164	+49%
Acrílico	0,0090	0,0139	+54%
Alvenaria	0,0150	0,0139	-8%
Cerâmico	0,0130	0,0124	-5%
Cimento-Amianto	0,0110	0,0107	-3%
Concreto	0,0130	0,0140	+8%
Ferro Fundido	0,0120	0,0083	-31%
Madeira	0,0120	0,0116	-3%
Metal Corrugado	0,0240	0,0232	-3%
Poliéster (PRFV) ou PEAD	0,0110	0,0103	-7%
PVC	0,0100	0,0132	+32%
GERAL	**0,0130**	**0,0131**	**0%**

Nota: [1] Diferença = $100(n_{méd}/n_{proj}-1)$.

Fonte: Chow (1959); Tsutiya e Alem Sobrinho (2011); e o Autor

A rugosidade de Manning média ($n_{méd}$) geral foi 0,013, ou seja, o mesmo valor recomendado pela Norma Nbr 9649 da ABNT (1986) para projeto de esgotos, porém os valores foram muito variáveis, de 0,002 a 0,051 (Figura 5), com pontos altos até 0,220, sendo que 34% foram acima de 0,013 (Tabela 2). Por outro lado, a Nbr 14486 da ABNT (2000) para projetos de rede de esgotos com PVC não é coerente com o escoamento real de esgotos sanitários, pois cerca de 65% dos valores superaram o valor recomendado de 0,010, e a média foi de 0,0132, sobretudo graças aos elementos operacionais reais de campo. Por isso, Gerard *et al.* (1989) obtiveram médias 0,0174 para PVC e 0,0196 para concreto em coletores sanitários no Canadá, por exemplo.

Considerando somente o elemento biofilme, conforme a Figura 6, afirma-se que o limo ou zoogleia aderidos às paredes internas aumentam a rugosidade do conduto, independentemente do tipo de material empregado, pois mesmo os materiais lisos e testados em laboratório com esgotos sanitários apresentaram valores de rugosidade (n) acima de 0,013, em sua quase totalidade dos resultados. Nessa situação e no Reino Unido, Rahim (2017) obteve valor médio ($n_{méd}$) 0,0161 para acrílico, enquanto Perkins e Gardiner (1985) obtiveram 0,0139 para PVC e 0,0155 para cimento-amianto, cerâmico e concreto. Outrossim, nos ensaios de campo com coletores de esgotos brutos, os valores de rugosidade obtidos foram também elevados e variados. Nessa linha, Pomeroy (1967) obteve um valor médio de 0,014 para cimento-amianto, cerâmico e concreto, dentro da faixa entre 0,0077 e 0,0409, nos EUA, enquanto Ackers *et al.* (1964) obtiveram uma média de 0,0153 para aço, alvenaria, cerâmico e concreto nos EUA e no Reino Unido.

Dependendo da qualidade, os sistemas que transportam água bruta podem conter biofilme aderido (Figura 6), sendo que é uma preocupação antiga dos especialistas, tal qual Barnes (1916). Assim, em aqueduto de concreto no Reino Unido, Winser, Hill e Barnes apresentaram um valor médio de rugosidade de 0,013 para uma faixa de 0,0123 a 0,0133. Adicionalmente, para madeira ensaiada com seção plena (conduto forçado), Noble obteve um valor médio de rugosidade ($n_{f,méd}$) 0,013, dentro da faixa de 0,0120 a 0,0133. Por fim, nos EUA, Clarke obteve $n_{f,méd}$ igual a 0,014 (faixa de 0,0136 a 0,0140) para alvenaria de tijolos transportando água bruta com sedimentos e esgotos, sob pressão (Barnes, 1916).

Na contramão dos demais resultados com biofilme, BISHOP (1978) obteve em campo o valor médio de rugosidade 0,0091 para PVC. Apesar da faixa entre 0,0069 e 0,0142, a maioria dos resultados ficou abaixo de 0,010 (vide Figura 6), portanto, similares aos de testes laboratoriais com água limpa. Entretanto, não foi citado se houve limpezas durante os 5 anos testados, assim como foi apontado nos testes de Pomeroy (1967).

Cabe destacar que os resultados de BISHOP (1978) foram amplamente citados por fabricantes internacionais e nacionais como a referência para definição do critério de valores de rugosidade para projetos com condutos em PVC, sendo n=0,009 ou, ainda, n=0,010 da norma brasileira (ABNT, 2000). Todavia, diante dos demais ensaios sob situações reais operacionais, esses valores baixos são totalmente equivocados para serem utilizados em critérios de projeto e dimensionamento de coletores de esgotos (Guzmán *et al.*, 2007). Contudo, anexando aos já citados experimentos laboratoriais com biofilme (Figura 6), que corroboram com essa constatação, Guzmán *et al.* (2007) obtiveram valores de rugosidade (n) sempre superiores a 0,013 para PVC, na faixa de 0,0134 a 0,0400, em testes com esgotos sanitários contendo biofilme aderido às paredes, contra a faixa obtida de 0,0086 a 0,0104 para testes que realizaram sem a formação do biofilme no interior.

Considerando os obstáculos presentes nos condutos (

Figura 7), Pomeroy (1967) e Ackers *et al.* (1964) obtiveram valores de campo abaixo de 0,013 somente nos trechos sem obstáculos significativos ou que tiveram limpezas prévias. Ackers *et al.* (1964) citaram a presença de camada de gordura e de depósitos de lodo nas galerias em alvenaria de tijolos, sendo que a rugosidade média foi 0,0191 para os valores variando entre 0,0097 e 0,0183, devido à gordura, e entre 0,0145 e 0,0183 pelo depósito de lodo e sólidos, extrapolando ainda em 0,0440 por causa das camadas de lodo e de sedimentos juntos. Enquanto isso, Pomeroy (1967) justifica os maiores valores de rugosidade obtidos pelos obstáculos encontrados em diversos trechos: 0,0409 pelos depósitos de lodo com 10cm de altura, de 0,0179 a 0,0218 pelas pedras depositadas até 2,5cm de altura, e de 0,0140 a 0,0220 pelas juntas desalinhadas e declividade irregular, que geraram turbulência.

Com água limpa e em laboratório, Yarnell e Woodward (1920) obtiveram valor médio de rugosidade 0,0149 para cerâmico com assentamento irregular e juntas desalinhadas (obstáculos), dentro da faixa entre 0,0109 e 0,0272 (vide Figura 7), sendo superiores aos bem assentes que também ensaiaram, demonstrando, assim, a importância do correto assentamento do conduto, que muitas vezes é negligenciado no Brasil.

Ao simular blocos desmoronados, Horoshenkov *et al.* (2004) obtiveram em laboratório os seguintes valores médios de rugosidade para concreto (DN 600mm): 0,0123 (faixa de 0,0109 a 0,0139) com água limpa, e 0,0328 (faixa de 0,0262 a 0,0470) com obstáculos periódicos (tijolos) no fundo, que reduziram muito a velocidade, mesmo ocupando apenas 1,2% do volume total dos tubos, conforme apresenta aFigura 7 . Por outro lado, Candia (2005) obteve rugosidade média 0,0149 para PVC, com a grande maioria dos valores acima de 0,013 (cf. Figura 7), devido a uma mangueira (obstáculo de pequeno diâmetro) no fundo, colocada para injetar ar no fluido, e pelos sedimentos aderidos com o tempo, pois os testes laboratoriais com água visaram o cálculo da aeração nos esgotos.

Utilizando água do rio Mississippi nos EUA, Seal *et al.* (1997), Toro-Escobar *et al.* (2000) e Campisano *et al.* (2013) verificaram a influência dos sedimentos e pedras nos condutos de drenagem. Portanto, criaram obstáculos de madeira ao longo do fundo de um canal aberto e revestido com membrana impermeável de PVC liso (conduto em PVC) para reter os sedimentos, obtendo, assim, valores de rugosidade elevadíssimos, chegando até 0,1567, devido a sinergia entre os sedimentos, pedras e obstáculos de madeira (vide quadro em destaque naFigura 7). Nesse caso, os obstáculos aumentaram muito a rugosidade, em comparação com a rugosidade média somente com sedimentos 0,0223 por SEAL *et al*. (1997) e 0,0294 por Campisano *et al.* (2013), porque com obstáculos os valores médios foram 0,0988 por Toro-Escobar *et al.* (2000) e 0,1069 por Campisano *et al.* (2013). Todavia, considerando somente os sedimentos suspensos ou sedimentáveis, que são comuns em esgotos (areia, por ex.), Campisano *et al.* (2013) apresentaram um valor para rugosidade do conduto (n_s) 0,0222, que é usualmente adotado em sistemas de drenagem pluvial ou em sistemas combinados de drenagem e esgotos sanitários. Dessa forma, os sedimentos também aumentam sobremaneira a rugosidade real de Manning (n) e independe do material empregado, sendo ainda um sério obstáculo ao movimento do fluido quando acumulados no fundo, ao reduzir a seção transversal do conduto.

Nesse sentido, os maiores valores de rugosidade dos ensaios com sedimentos (Figura 8) ocorreram quando eram depositados no fundo, reduzindo, assim, a seção transversal, caso de alguns testes laboratoriais de AB. Ghani (1993), May (1993) e Banasiak e Verhoeven (2008) e da maioria dos testes laboratoriais de Perrusquía *et al.* (1986) e Knight e Sterling (2000). Nesse caso, Perrusquía *et al.* (1986), May (1993) e AB. Ghani (1993) obtiveram rugosidades entre 0,009 e 0,011 (0,010 de média), para concreto limpo, enquanto a

rugosidade (n_s) variou de 0,011 até 0,029 (0,014 de média), para concreto com sedimentos que ocupavam até 37,8% da seção transversal do conduto. Analogamente, Knight e Sterling (2000) alcançaram rugosidades (n_s) de 0,010 até 0,033 (média 0,017), para PVC com sedimentos ocupando de 25 a 66% da seção transversal, contra uma rugosidade sem sedimentos (n) de 0,010.

Em relação aos ensaios laboratoriais com transporte de sedimentos sem depósitos no fundo, Safari *et al.* (2017) e Montes *et al.* (2020) apresentaram uma faixa (n_s) de 0,010 a 0,031 e uma média de 0,014 para condutos de acrílico, sendo que a rugosidade aumentou com o acréscimo da concentração volumétrica de sedimentos no fluido transportado. Entretanto, Pianese e Della Morte (2004) e Vongvisessomjai *et al.* (2010) obtiveram valores quase constantes de rugosidade (n_s), de 0,009 a 0,010 para acrílico e 0,013 para PVC, respectivamente, independente da variação da concentração de sedimentos (Figura 8). Além disso, AB. Ghani (1993) obteve (n_s) entre 0,008 e 0,013 para PVC, com a maioria dos valores acima de 0,010.

Os experimentos de campo (Figura 8) apresentaram em sua maioria valores de rugosidade bem acima de 0,013, em razão da altura de sedimentos depositados ao longo do fundo, em condutos existentes que foram ensaiados no EUA (Schmidt, 1959 e Johnson) e no Reino Unido (May, Ackers e Henderson). Nesse caso, as alturas variaram entre 25mm (Ackers *et al.*, 1964) e 140mm (Schmidt, 1959), ocupando de 2,5% a 10,9% (concreto e alvenaria por Ackers), de 2,7 a 4,2% (concreto por Johnson e May), de 4,8 a 5,4% (concreto por Schmidt) e até 35% (cerâmico, concreto e alvenaria por Henderson) da seção transversal do coletor (Perrusquía *et al.*, 1986). O maior valor 0,0495 foi devido a sinergia com o lodo depositado, isto é, com um obstáculo que também reduziu a seção (Ackers *et al.*, 1964).

Contudo, em geral, quanto maior a concentração e/ou a altura de sedimentos depositados (Figura 8) e/ou a presença de obstáculos (Figura 7)) e/ou a camada de biofilme (Figura 6), que reduzem a área da seção transversal do conduto, maior será a rugosidade real do conduto (n) e, com isso, menor a velocidade (v), independentemente do material do conduto. Além disso, a rugosidade em seção plena de fluido (n_f) é menor do que a rugosidade normal (n), e a rugosidade relativa (n/n_f) é maior próxima ao eixo ($y/D \approx 40\%$), pela Figura 4.

Vale ainda apresentar duas equações derivadas do presente estudo de rugosidade (equações 4 e 5), que são muito mais representativas para a realidade operacional do que as equações existentes para a hidráulica de coletores de esgotos. Assim sendo, a primeira equação proposta (equação 4) é a melhor para converter o valor da altura de rugosidade de Colebrook-White (k_s) para o valor do coeficiente de rugosidade de Manning (n) (Coelho, 2022; Coelho e Azevedo; 2022).

$$n = 0{,}0418 \cdot k_s^{0{,}167} \qquad \text{equação (4)}$$

$$n = a \cdot F^b = (-0{,}0195 \cdot b - 0{,}009) \cdot F^b \qquad \text{equação (5)}$$

Sendo: n = coeficiente de rugosidade de Manning ($m^{-1/3}s$);

k_s = altura de rugosidade por Colebrook-White (m);

F = número de Froude (adimensional) = $v \cdot g^{-0{,}5} \cdot Y^{-0{,}5}$

v = velocidade (m/s);

g = aceleração da gravidade (ms^{-2});

Y = profundidade hidráulica (m) = área de seção transversal/largura sup. d'água;

b = coeficiente para as condições operacionais hidráulicas no conduto.

Por outro lado, a segunda equação proposta (equação 5) é bem mais adequada para representar o movimento hidráulico do fluido dentro do conduto de esgotos do que a equação de Manning (equação 1), pois é dimensionalmente homogênea e adimensional, já que correlaciona o número adimensional de Froude (F) com o coeficiente de rugosidade de Manning (n).

Nesse caso, a equação 5 pode ser utilizada para representar o movimento hidráulico desde as condições operacionais mais favoráveis (tubos novos, bem assentes etc.), i.e., desde o valor limite superior de b = −0.5, até às piores condições operacionais (reais, tubos com sedimentos e obstáculos etc.), i.e., até o valor limite inferior de b = −3.0 (Coelho e Azevedo, 2022).

A equação 5 é válida para valores de Froude na faixa de $0,11 \leq F \leq 2,30$, sendo bem mais precisa para a faixa $0,11 \leq F \leq 1,50$ ($R^2=0,999$), ou seja, desde o escoamento subcrítico ($0,11 \leq F < 1$) até o supercrítico inicial ($1,0 < F \leq 1,5$) (Coelho e Azevedo, 2022).

É importante então destacar que a equação 5 traduz os impactos da turbulência, do biofilme, dos sedimentos, dos obstáculos e do movimento (entre outros fatores) no aumento da rugosidade hidráulica, e vice-versa, pois quanto maior o número de Froude menor será o efeito na rugosidade hidráulica, por exemplo. Por isso, pode substituir a famosa equação de Manning ($v=n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$), que não é dimensionalmente homogênea.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados comprovaram os estudos anteriores sobre a variação do coeficiente de Manning com a maioria dos parâmetros hidráulicos, exceto quando o sistema estiver sob conduto forçado, pois a rugosidade n_f tende a ser constante e menor do que a rugosidade n, independente de outros parâmetros (vide Figura 4). Portanto, de acordo com a tendência apresentada, que vale para pelo menos 50% das redes assentes no mundo, quanto menores os diâmetros (~150 mm), as declividades (~0,005 m/m) e as lâminas d'água (~50%), e, assim, menores as vazões (~10 l/s), as velocidades (~1,0 m/s), os números de Reynolds (~100.000) e as tensões trativas (~1,5Pa), maiores serão os coeficientes de rugosidade (n) de Manning. Geralmente, extrapolam o n=0,013 e o n=0,010 (PVC) das normas ABNT, especialmente nos ensaios de campo em condutos existentes de esgotos e nos ensaios de laboratório com esgotos sanitários, realizados pelos pesquisadores. Nesse caso, as camadas aderidas de biofilme e de sedimentos presentes nos esgotos sanitários são as maiores responsáveis por esse aumento da resistência ou da rugosidade real da tubulação, mesmo em camadas formadas com poucas semanas de operação, além da presença de obstáculos ao fluxo, sejam estes transitórios ou permanentes.

Na prática, principalmente nos países em desenvolvimento (Brasil), onde o sistema separador funciona como misto ou tempo seco com a drenagem pluvial e vice-versa, é comum a presença de muitos sedimentos, biofilme e obstáculos (Coelho e Azevedo, 2021). Assim sendo, recomenda-se que o valor único mínimo para o critério de rugosidade (n) seja superior a 0,013. Por isso, sugere-se n=0,015 para dimensionamento em projetos de coletores de esgotos sanitários de qualquer material, inclusive PVC e PEAD (corrugado

externo e liso interno), exceto n=0,024 para condutos corrugados internos (drenagem: metal corrugado, PEAD e aço) ou para sistemas de esgotos combinados contendo sedimentos e/ou obstáculos.

Nesse sentido, critérios para valores de rugosidades fixos e diferentes para início e fim de plano de projeto (Carrera e La Motta, 2020) podem ser adotados, sendo um valor de rugosidade ($n=n_{início}$) menor para início operacional (condições totalmente favoráveis) e um valor ($n=n_{final}$) bem maior para final de plano (condições reais de utilização).

Sugere-se, então, o valor de rugosidade n=0,015 (em média) para critério de projeto de coletores sanitários no fim de plano, para cobrir as situações reais de operação, e o valor n=0,013 para início de plano, sendo que valores iniciais menores (n<0,013) tem restrições porque as velocidades são menores e, consequentemente, as rugosidades são maiores no início, comprovadas nos testes realizados em campo pelo autor deste trabalho.

Além disso, sugere-se fortemente a utilização das equações 4 e 5 para substituírem a famosa equação de Manning (equação 1), porque essas equações são mais adequadas para representar a rugosidade hidráulica e o movimento (escoamento) hidráulico em coletores (condutos) de esgotos.

Para futuras pesquisas sobre o tema, recomenda-se analisar os custos operacionais decorrentes de um projeto com os valores de coeficientes de rugosidade normatizados, que não são condizentes com a operação real dos sistemas de esgotos sanitários e que geram episódios frequentes de manutenção e reparação dos coletores, e compará-los aos custos com os valores de rugosidade aqui propostos. Faz-se mister calcular o tempo do retorno de investimento ao longo do período operacional, devido ao provável aumento dos custos de implantação (construtivos) com os valores propostos. Entretanto, os valores recomendados pelo autor deste trabalho reduzem sobremaneira os custos operacionais (limpezas, desobstruções, dentre outros) e até de implantação, ao evitar a substituição futura de coletores totalmente inoperantes e, consequentemente, aumentam o tempo de vida útil dos coletores sanitários.

REFERÊNCIAS

[1] AB. GHANI, A. **Sediment Transport in Sewers**. PhD thesis. Department of Civil Engineering of the University of Newcastle Upon Tyne, Newcastle Upon Tyne, United Kingdom, 362p, Nov/1993.

[2] ABNT. **NBR 14486 - Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário - Projeto de redes coletoras com tubos de PVC**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, mar 2000.

[3] ABNT. **NBR 9649 - Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro/RJ, Associação Brasileira de Normas Técnicas, nov 1986.

[4] ACKERS, P.; HRS; COLEBROOK, C. F; WHITE, C. M. **The Hydraulic Resistance of Drainage Conduits**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. v. 19, n. 3 (Jul), pp. 307-336, 1961.

[5] ACKERS, P.; CRICKMORE, M. J.; HOLMES, D. W.; HRS. **Effects of Use on The Hydraulic Resistance of Drainage Conduits**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 28, n. 3 (Jul), pp. 339-360, 1964.

[6] ASCE. **Determining Rehabilitated Sewer Flow Capacity**, Journal of Transportation Engineering, American Society of Civil Engineers Task Comm., v. 122, n. 3 (*May/Jun*) pp. 258-261, 1996.

[7] BANASIAK, R.; VERHOEVEN, R. **Transport of Sand and Partly Cohesive Sediments in a Circular Pipe Run Partially Full,** Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 134, n. 2 (Fev), pp. 216-224, 2008.

[8] BARNES, A. A. **Hydraulic flow reviewed: a book of reference of standard experiments on pipes, channels, notches, weirs, and circular orifices, together with new formulae relating thereto**. E. & F. N. Spon, Limited, London, UK, (ICE Publishing, London, UK Thomas Telford Limited 2011), 1916.

[9] BISHOP, R. R., **Hydraulic Characteristics of PVC Pipe in Sanitary Sewers (A Report of Field Measurements)**. In: Reports. Paper 598, 1978.

[10] BLOODGOOD, D. E.; BELL, J. M. **Manning's Coefficient Calculated from Test Data,** Journal of Water Pollution Control Federation, v. 33, n. 2 (Fev), pp. 176-183, 1961.

[11] BOMBARDELLI, F. A; GARCÍA, M. H. **Hydraulic Design of Large-Diameter Pipes**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 129, n. 11 (Nov), pp. 839-846, 2003.

[12] CAMPISANO, A.; CREACO, E.; MODICA, C. **Numerical modelling of sediment bed aggradation in open rectangular drainage channels**, Urban Water Journal, v. 10, n. 6, pp. 365–376, 2013.

[13] CANDIA, M. F. G. **La Aireación en Sistemas de Alcantarillado: Efecto Sobre la Capacidad Hidráulica de las Tuberías**. Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colômbia, 207p, Jul 2005.

[14] CARRERA, C.; LA MOTTA, E. J. **Herramientas gráficas de diseño para determinar la pendiente mínima de autolimpieza en tuberías de alcantarillado sanitario de pequeño diámetro**. Ingeniería del Agua, IWA Publishing, Editorial UPV, FFIA, v. 24 (1), pp. 49-63, 2020.

[15] CHOW, V., T. **Open-Channel Hydraulics**. Reissued 1988. United States of America, Ed. *McGraw-Hill Book Company Inc.*, 1959.

[16] COELHO, F. M. **Coletor Sanitário: nova metodologia de dimensionamento de coletores de esgoto**. 1. ed. São Paulo: Editora Dialética, 2022. 332p. DOI: http://dx.doi.org/10.48021/978-65-252-3993-4.

[17] COELHO, F. M.; AZEVEDO, J. P. S. de. **Critérios para coeficientes de rugosidade sob condições reais operacionais em projetos de coletores sanitários**. In: 31º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021, Curitiba-PR. 31º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021.

[18] COELHO, F. M.; AZEVEDO, J. P. S. **Design criteria for roughness values under real sewer system operating conditions**. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, v. 13, p. 04022018-1-14, 2022. DOI: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000654.

[19] COSENS, K. W. **Sewer Pipe Roughness Coefficients**. Sewage and Industrial Wastes, Water Environment Federation (WEF), v. 26, n. 1 (Jan), pp. 42-50, 1954.

[20] DANIELETTO, J. R. B. **Manual de tubulações de polietileno e polipropileno: características, dimensionamento e instalação**. São Paulo, Ed. Linha Aberta, 2007.

[21] DEVKOTA, J. P. **Variation of Manning's Roughness Coefficient with Diameter, Discharge, Slope and Depth in Partially Filled HDPE Culverts**. M.Sc. Thesis, Youngstown State University, May 2012.

[22] EAD, S. A.; RAJARATNAM, N.; KATOPODIS, C.; ADE, F. **Turbulent Open-Channel Flow in Circular Corrugated Culverts**, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 126, n. 10 (Out), pp. 750-757, 2000.

[23] GEMICI, Z.; KOCA, A.; KAYA, K. **Predicting the Numerical and Experimental Open Channel Flow Resistance of Corrugated Steep Circular Drainage Pipes**. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, ASCE (American Society of Civil Engineers), USA, v. 8, n. 3 (Ago), 04017004, 2017.

[24] GERARD, R.; BOUTHILLIER, P.; BESMEHN, J. **Field measurements of the hydraulic resistance of sanitary sewers**. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 16, n. 6, pp. 936-944, 1989. (DOI: 10.1139/l89-137).

[25] GUENSCH, G. R.; RICHMOND, M. C.; TRITICO, H.; PEARSON, W. H. **Characterization of Turbulent Open Channel Flow in a Full Scale Spiral Corrugated Culvert**. In: World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Salt Lake City, Utah, USA, Jun27-Jul1, 2004.

[26] GUZMÁN, K.; LA MOTTA, E.; MCCORQUODALE, J.; ROJAS, S.; ERMOGENOUS, M. **Effect of Biofilm Formation on Roughness Coefficient and Solids Deposition in Small-Diameter PVC Sewer Pipes**. Journal of Environmental Engineering, v. 133, n. 4 (Abr), pp. 364-371, 2007. ISSN 0733-9372/2007/4, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2007)133:4(364).

[27] HOROSHENKOV, K.V.; YIN, Y.A.; SCHELLART, A.; ASHLEY, R.M.; BLANKSBY, J.R. **The acoustic attenuation and hydraulic roughness in a large section sewer pipe with periodical obstacles**, Water Science and Technology, IWA, v. 50, n. 11, pp. 97-104, 2004.

[28] HUISMAN, J. L.; WEBER, N.; GUJER, W. **Reaeration in sewers**. Water Research, Elsevier, v. 38, n. 5, pp.1089–1100, 2004.

[29] KNIGHT, D. W.; STERLING, M. **Boundary Shear in Circular Pipes Running Partially Full**, Journal of

Hydraulic Engineering, ASCE, v. 126, n. 4 (Abr), pp. 263-275, 2000.

[30] MANGIN, S. F. **Development of an Equation Independent of Manning's Coefficient n for Depth Prediction in Partially-Filled Circular Culverts**. M. Sc. Thesis, Civil and Environmental Engineering Program, Youngstown State University, Youngstown, Ohio, USA. 159p. Ago 2010.

[31] MANNING, R. **On the flow of water in open channels and pipes**, Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland – ICEI, Dublin, Ireland. v. XX, 54th and 55th sessions - to Jun 1890, pp. 161-207. 1891.

[32] MAY, R.W.P. **Sediment transport in pipes and sewers with deposited beds**. In: Report SR 320 (2-feb-93), HR Wallingford Limited, Oxfordshire, UK, Jan 1993, 108p.

[33] MEKY, M. S. A.; GHORABA, S. M.; RASHWAN, I. M. H. **Effect of Water Depth Change on Manning Coefficient for Partially-Filled Circular Culverts**. Mansoura Engineering Journal (MEJ), v. 40, n. 2 (June), pp. 38-52, 2015.

[34] MERA, M.; ROBI, R. **Determination of Manning Roughness Coefficient for PVC Gutters**. Jurnal Teknik Sipil - Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil - ISSN 0853-2982 - Technical Notes. v. 20, n. 2 (Ago), pp. 153-160, 2013.

[35] MONTES, C.; BERARDI, L.; KAPELAN, Z.; SALDARRIAGA, J. **Predicting bedload sediment transport of non-cohesive material in sewer pipes using evolutionary polynomial regression – multi-objective genetic algorithm strategy**, Urban Water Journal, Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group, 08/Apr/2020. (DOI: 10.1080/1573062X.2020.1748210).

[36] NEALE, L. C.; PRICE, R. E. **Flow Characteristics of PVC Sewer Pipe**. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of ASCE, pp. 109-128, Jun 1964.

[37] PERKINS, J. A.; GARDINER, I. M. **The Hydraulic Roughness of Slimed Sewers**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. v. 79 (*Part* 2), n. 1 (Mar), pp. 87-104, 1985.

[38] PERRUSQUÍA, G.; LYNGFELT, S.; SJÖBEG, A. **Flödeskapacitet hos avloppsledningar delvis fyllda med sediment - En inledande experimentell och teoretisk studie**. In: Report Series B:48, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sverige (SWE), 1986.

[39] PIANESE, D.; DELLA MORTE, R. **Discussion of Urban Storm Sewer Design: Approach in Consideration of Sediments, by Jose J. Ota and Chandra Nalluri**. J. Hydraul. Eng., ASCE, v.130, n.7(Jul), pp.718-719, 2004.

[40] POMEROY, R. D. **Flow Velocities in Small Sewers**. Journal of Water Pollution Control Federation, Water Environment Federation (WEF), v. 39, n. 9 (Set), pp. 1525-1548, 1967.

[41] RAHIM, A. A. *Laboratory* **studies of physical transformation processes in sewers by wastewater-grown biofilms**. Ph.D. Thesis, The University of Sheffield, UK, Dec 6, 223p, 2017.

[42] SAFARI, M. J. S.; AKSOY, H.; UNAL, N. E.; MOHAMMADI, M. **Non-deposition self-cleansing design criteria for drainage systems**, Journal of Hydro-environment Research, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research-IAHR, v.14, n.1 (Mar), pp76-84, ISSN 1570-6443, 2017.

[43] SANTOS, D. C. Dos; LOBATO, M. B.; AISSE. M. M.; GOMES. C. S. **Estudos da rugosidade de tubulações de PVC, para esgotos sanitários, em condições críticas de funcionamento hidráulico, com a verificação da tensão trativa**. II-379. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 18 a 23 de set/2005. Campo Grande/MS. 2005.

[44] SCHMIDT, O. J. **Measurement of Manning's Roughness Coefficient**. Sewage and Industrial Wastes, Water Environment Federation (WEF), v. 31, n. 9 (Set), pp. 995-1003, 1959.

[45] SEAL, R.; PAOLA, C.; PARKER, G.; SOUTHARD, J.B.; WILCOCK, P.R. **Experiments on downstream fining of gravel: I. Narrow channel runs**. J. Hydraul. Eng., ASCE, v.123, n.10 (Out), pp. 874–884, 1997.

[46] STANIĆ, N.; CLEMENS, F. H. L. R.; LANGEVELD, J. G. **Estimation of Hydraulic Roughness of Concrete Sewer Pipes by Laser Scanning**. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 143, n. 2 (Feb-Sep), 04016079, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001223.

[47] STRAUB, L. G.; MORRIS, H. M. **Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes, Technical Paper No. 3-Series B**. In: University of Minnesota Centennial (1851-1951), St. Anthony Fall Hydraulic Laboratory, Minneapolis/Minnesota-USA, July 1950 (1951).

[48] TORO-ESCOBAR, C. M.; PAOLA, C.; PARKER, G.; WILCOCK, P. R.; SOUTHARD, J. B. **Experiments on**

Downstream Fining of Gravel. II: Wide and Sandy Runs. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v.126, n.3, pp.198–208, 2000.

[49] TSUTIYA, M. T.; ALEM SOBRINHO, P. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 3a ed. Rio de Janeiro, ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.

[50] VONGVISESSOMJAI, N.; TINGSANCHALI, T.; BABEL, M. S. **Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow**, Urban Water Journal, Taylor & Francis Group, v. 7, n. 1 (Fev), pp. 61-77, 2010.

[51] YARNELL, D. L.; WOODWARD, S. M. **The flow of water in drain tile**. In: Bulletin No.854, United States Department of Agriculture, Aug 26, Washington-D.C., USA, 50p, 1920.

Capítulo 13

Dinâmica de resfriamento de um arrefecedor evaporativo industrial em ambiente fechado

Brenno Evelim Lopes
Leôncio Diogenes Tavares Câmara

Resumo: Foi estudada a dinâmica de resfriamento, de um arrefecedor evaporativo industrial em um ambiente fechado, neste caso o Laboratório de Fluidos do Instituto Politécnico da Uerj, utilizando diferentes pontos de medição de temperatura. As condições atmosféricas do local foram obtidas através da estação meteorológica da instituição (CETEMA, IPRJ-UERJ). A partir dos experimentos observou-se que a maior taxa de resfriamento está condicionada, principalmente, à maior incidência do fluxo de névoa de água, ou seja, depende da posição em relação à altura e distância do arrefecedor evaporativo no ambiente. Outro fator fundamental é a umidade relativa, que tem relação inversa com a taxa de arrefecimento do ambiente. Os perfis experimentais de temperatura foram correlacionados com diversos modelos matemáticos, sendo observado um melhor ajuste a partir de um modelo polinomial de segunda ordem.

Palavras-chave: Resfriamento evaporativo, psicrometria, arrefecedor industrial.

1. INTRODUÇÃO

O resfriamento evaporativo consiste em um método relativamente simples de arrefecimento, o qual é baseado na troca simultânea de calor e massa entre uma corrente de ar úmida (névoa de água) com o ambiente no qual se quer resfriar, deixando, este último, mais fresco e úmido.

Afrescos do Egito Antigo, datados de 2500 a.C., mostram escravos abanando recipientes de paredes porosas com o intuito de resfriar o seu conteúdo (Almeida et al, 2009). Os filtros de água atuais, feitos de barro, possuem características similares, os quais reduzem a temperatura da água em seu interior por evaporação da água em sua superfície.

Podemos citar alguns lugares, os quais são mais adequados para a utilização de arrefecedores evaporativos, como: armazenamento de produtos hortifrutigranjeiros, locais abertos com grande público, indústrias com máquinas dissipadoras de calor, abrigo de animais, ambientes de umidade relativa controlada, espaços destinados ao cultivo de plantas, dentre outros (Camargo et al, 2000).

Quando comparado aos sistemas de resfriamento tradicionais, o resfriamento evaporativo apresenta algumas vantagens como: menor custo operacional; resfriamento de grandes ambientes; menor impacto no meio ambiente; grande renovação do ar no ambiente, com melhor qualidade do ar e redução de microorganismos; possível utilização como sistema de pré-resfriamento em sistemas de refrigeração convencionais etc (Camargo, 2003/2004).

Diversos estudos científicos tem sido realizados na área a fim de melhorar a performance dos sistemas de arrefecimento evaporativo (Yamada et al., 2008; Ulpiani et al., 2020; Farnham et al., 2017). Ulpiani et al., 2020, realizaram estudos do efeito das condições meteorológicas sobre a eficiência de resfriamento de um sistema de arrefecimento evaporativo urbano. Eles demonstraram que a capacidade de resfriamento era fortemente função da depressão da temperatura local do bulbo úmido, com influencia negativa e positiva, respectivamente, da irradiação solar e velocidade do vento. Yamada et al., 2008, avaliaram, através de modelagem e simulação, os efeitos do resfriamento evaporativo no contexto da distribuição do tamanho das partículas de névoa de água injetada no ambiente. Os autores não observaram, a partir dos resultados numéricos, diferença na redução da temperatura do ambiente, por parte da variação no tamanho das partículas de névoa. Farnham et al., 2017, estudaram os efeitos térmicos de um arrefecedor evaporativo oscilante em um ambiente de trabalho de grandes dimensões e observaram uma queda de temperatura na faixa de 0.2-4.0K com um aumento de umidade de 5%.

No presente estudo foi avaliada a dinâmica de resfriamento de um modelo de arrefecedor evaporativo industrial (Ebone climatizadores – Fog V) em um ambiente fechado, em que foi monitorada a temperatura em diferentes pontos ao longo do comprimento deste. Os dados experimentais foram correlacionados com diferentes modelos matemáticos a fim de se obter a melhor representação.

2. METODOLOGIA

A Psicrometria é o ramo da termodinâmica que se dedica ao estudo das misturas de vapor d'água com os gases secos. O ar atmosférico é uma mistura de diversos compostos, tais como: nitrogênio, oxigênio, argônio, vapor d'água, dióxido de carbono e também contaminantes como poeira, pólen entre outros (Elias, 2012). Quando o ar possui vapor d'água, este é denominado de úmido e, quando não, denominado de seco.

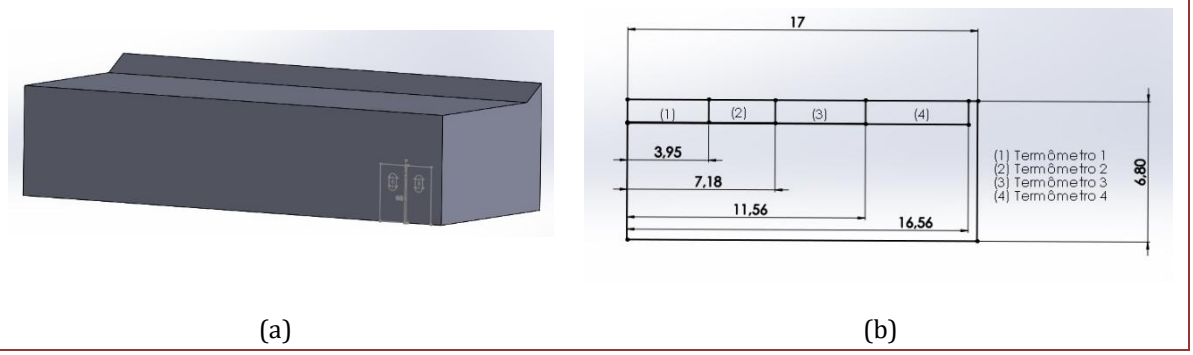
O resfriamento evaporativo se baseia na redução da temperatura do ar ambiente através da evaporação de um fluxo de névoa de água, que é formado por gotículas de água de dimensões de micrometros. O contato do fluxo de névoa de água com o ar ambiente, em uma temperatura mais elevada, vaporiza parte da névoa, retirando calor latente de vaporização, tornando o ar ambiente mais fresco e úmido. Desta forma, os dispositivos que funcionam através desse princípio são denominados arrefecedores evaporativos.

Dependendo das condições atmosféricas, pode-se obter reduções significativas de temperatura, como 11 ºC, alcançada nos EUA, e 6 °C, no Brasil, este último obtido tanto em regiões quentes quanto secas, como Triângulo Mineiro, Mato Grosso e Goiás (Winge, 2012).

$$\varepsilon = \frac{T_{bs1} - T_{bs2}}{T_{bs1} - T_{bu}} \qquad (1)$$

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Fluidos do Instituto Politécnico da UERJ em Nova Friburgo-RJ (IPRJ) o qual possui as seguintes dimensões: 17,0 x 6,8 x 3,9 m, o que corresponde a um volume de 450,16 m^3. A Fig. 1A abaixo apresenta um modelo 3D do laboratório, construído em SolidWorks, com a respectiva vista superior (Fig. 1B), a qual indica as posições dos termômetros, utilizados nas medições, em relação ao arrefecedor evaporativo, este último instalado no extremo à esquerda do laboratório.

Figura 1 – Projeto em CAD do laboratório de fluidos



(a) (b)

Na Fig. 2 abaixo temos uma imagem do modelo de arrefecedor evaporativo industrial utilizado nos experimentos, o qual é fabricado pela empresa Ebone Climatizadores - modelo Fog V.

Figura 2 – Imagem do arrefecedor evaporativo utilizado, modelo Fog V

Abaixo, na Tabela 1, temos as especificações técnicas do arrefecedor evaporativo utilizado.

Tabela 1 – Especificações do arrefecedor evaporativo

Modelo FogV	Especificação
Motor de aspersão de névoa	368W
Motor de rotação das hélices	150W
Potência total	518W
Peso	28,2kg

O consumo de água do arrefecedor evaporativo utilizado depende diretamente do fluxo de névoa de água injetado no ambiente. Esse fluxo pode ser regulado através de um controlador analógico localizado na lateral do equipamento. O arrefecedor possui um reservatório de água na parte inferior, a qual é bombeada para o dispersor de névoa, que consiste de um disco circular localizado na parte central do equipamento.

As medições de temperatura, no laboratório, foram realizadas através de quatro termômetros de bulbo, com erro de ± 0,5°C, os quais foram dispostos em linha reta, ao longo do comprimento do laboratório, a partir da posição do arrefecedor, localizado na parede à esquerda do primeiro termômetro (T1). Na Fig. 1B pode-se observar as localizações dos 4 termômetros, em sequência, T1, T2, T3 e T4, a partir do arrefecedor. Os termômetros T1, T2, T3 e T4, estavam localizados nas seguintes distâncias, respectivamente, 3.65, 7.18, 11.56 e 16.56m, a partir do arrefecedor, este último localizado na parede à esquerda do laboratório.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizados experimentos em dois dias diferentes, em condições ambientais distintas, a fim de se estudar o efeito da variação da umidade relativa nos experimentos. No primeiro dia foram realizados experimentos com temperatura ambiente e umidade relativa amenas enquanto que, no segundo dia, a umidade relativa encontrava-se numa faixa maior de valor, com a temperatura ambiente praticamente estável na mesma faixa do dia anterior.

As Tabelas 2 e 3 a seguir são relativas aos experimentos realizados no primeiro dia (Dia 1). Os dados da Tabela 2 foram obtidos da estação meteorológica (CETEMA), o qual está

instalada no próprio Instituto Politécnico da UERJ em Nova Friburgo-RJ. Já na Tabela 3, temos os dados termodinâmicos calculados a partir das propriedades apresentadas na Tabela 2. A temperatura da água utilizada no arrefecedor, medida no dia, foi de 24°C.

Tabela 2 – Dados do CETEMA (dia 1)

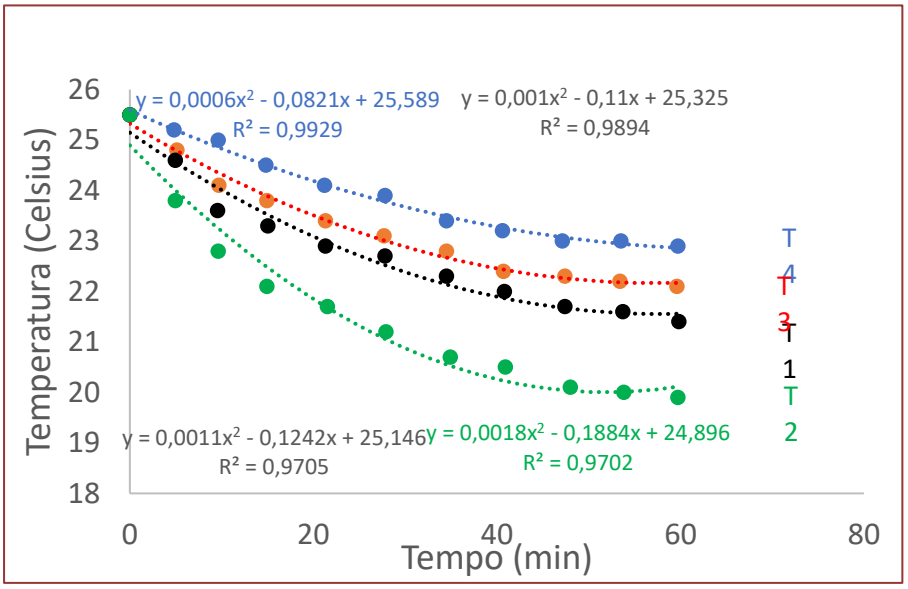
Pressão atmosférica	91,75kPa
Temperatura do ar	21,7ºC
Umidade relativa	51%

Tabela 3 – Tabela de propriedades termodinâmicas (dia 1)

Umidade absoluta	0,011638
Pressão parcial de vapor	1,6852kPa
Pressão parcial do ar seco	90,0648kPa
Pressão de saturação da água	3,3044kPa

A Figura 3, a seguir, apresenta os resultados da variação da temperatura, no laboratório de fluidos do IPRJ, para os 4 pontos de medição (termômetros), como descrito na Fig. 1B. Os dados experimentais, da Fig. 3, foram correlacionados com modelos polinomiais de segunda ordem (linhas), os quais apresentaram boa correlação, com coeficientes de correlação maiores que 97%. As variações de temperatura, no final do experimento, para os quatro pontos de medição, foram iguais a: ΔT_1= 4.2 °C, ΔT_2= 5.6 °C, ΔT_3= 4.0°C, e ΔT_4= 2.6°C. Com isso, percebe-se que, mesmo em longos tempos, as temperaturas não se equalizam, apresentando, neste caso, forte dependência com a posição do arrefecedor.

Figura 3 – Dinâmica de resfriamento (Dia)



Pode-se constatar, ao analisar o gráfico, que a menor queda de temperatura foi observada no termômetro 2 (T2), com delta de temperatura igual a 5.6 ºC, seguido dos termômetros T1, T3 e T4. O termômetro 1 (T1), mesmo estando a uma distância menor do arrefecedor,

4 metros, não alcançou temperatura menor que T2, este último a uma distância de 7 metros do arrefecedor evaporativo, como pode ser constatado na Fig. 1B. Estes resultados mostram que a direção do fluxo de névoa do arrefecedor é fundamental para o arrefecimento local do ambiente, uma vez que, no experimento realizado, o fluxo de névoa incidia mais diretamente sobre a posição do termômetro 2. O termômetro 1, por estar mais próximo do arrefecedor (4 m), não estava sujeito ao fluxo direto de névoa de água, uma vez que o arrefecedor evaporativo estava instalado a uma altura de 3m. Os termômetros 3 e 4, por estarem em distâncias maiores do arrefecedor, 11 e 16m, respectivamente, não recebiam toda a densidade de névoa dos termômetros anteriores, devido aos efeitos evaporativos, que levavam à perda de massa de água por evaporação para as camadas superiores do laboratório.

A eficiência do arrefecimento do ambiente estudado, em termos do local, pode ser melhor observada pelos cálculos de efetividade, que constam da Tabela 4 abaixo. O termômetro 2, devido à posição de maior fluxo de névoa, obteve a maior efetividade de resfriamento. O termômetro 1, por não receber fluxo direto de névoa, embora numa menor distância do arrefecedor (4 m), obteve valor de efetividade na ordem de grandeza do termômetro 3, que estava a 11 m do arrefecedor.

Tabela 4 – Resultados de efetividade de resfriamento (dia 1)

Termômetro 1	58,6%
Termômetro 2	78,1%
Termômetro 3	52,2%
Termômetro 4	36,3%

As Tabelas 5 e 6 a seguir são relativas aos experimentos realizados no segundo dia (Dia 2). Os dados da Tabela 5 foram obtidos da estação meteorológica (CETEMA), o qual está instalada no próprio Instituto Politécnico da UERJ em Nova Friburgo-RJ. Já na Tabela 6, temos os dados termodinâmicos calculados a partir das propriedades apresentadas na Tabela 5. A temperatura da água utilizada no arrefecedor, medida no dia, foi de 24°C.

Observa-se, a partir da Tabela 5, um valor de umidade relativa bem superior a do primeiro dia, devido a uma chuva que aconteceu na região no dia anterior.

Tabela 5 – Dados do CETEMA (dia 2)

Pressão atmosférica	91,47kPa
Temperatura do ar	25,3ºC
Umidade relativa	67%

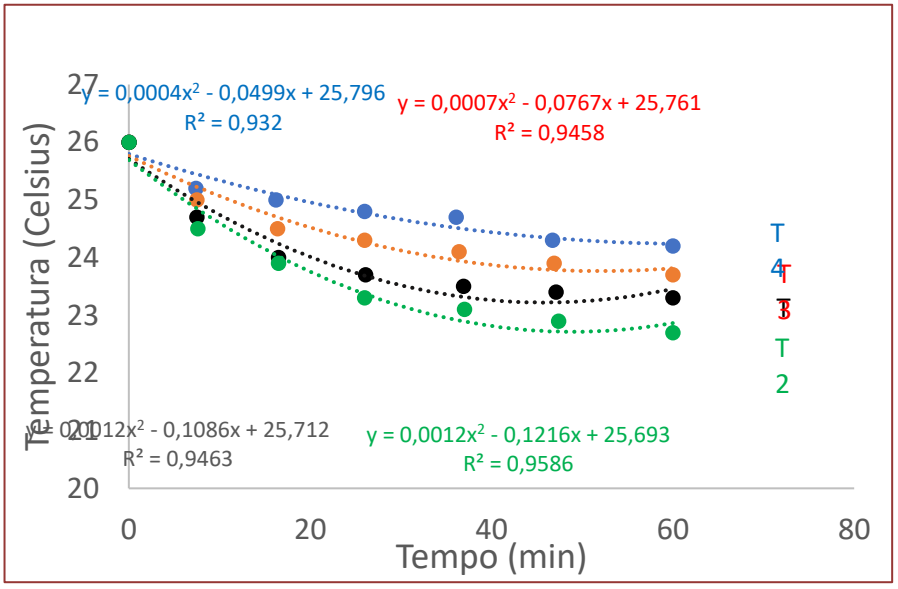
Tabela 6 – Tabela de propriedades termodinâmicas (dia 2)

Umidade absoluta	0,01548
Pressão parcial de vapor	2,2212kPa
Pressão parcial do ar seco	89,2488kPa
Pressão de saturação da água	3,3152kPa

A Figura 4, a seguir, apresenta os resultados da variação da temperatura, para o segundo dia, no laboratório de fluidos do IPRJ, para os 4 pontos de medição (termômetros), como descrito na Fig. 1B. Os dados experimentais, da Fig. 4, foram correlacionados com modelos

polinomiais de segunda ordem (linhas), os quais apresentaram coeficientes de correlação inferiores aos do primeiro dia, com coeficientes de correlação maiores que 93%. Os coeficientes de correlação entre os modelos e os dados experimentais, no primeiro dia de experimentos, foi de 97%. As variações de temperatura, no final do experimento, para os quatro pontos de medição, foram iguais a: ΔT1= 2.5 °C, ΔT2= 2.9 °C, ΔT3= 2.2°C, e ΔT4= 1.0°C. Com isso, percebe-se, novamente, que, mesmo em longos tempos, as temperaturas não se equalizam, apresentando, também neste caso, como no primeiro dia de experimentos (Dia 1) forte dependência com a posição do arrefecedor. Observa-se, a partir da Tabela 5, um valor de umidade relativa bem superior a do primeiro dia, devido a uma chuva que aconteceu na região no dia anterior.

Figura 4 – Dinâmica de resfriamento (Dia)



A eficiência do arrefecimento do ambiente estudado pode ser melhor observada pelos cálculos de efetividade, que constam da Tabela 7 abaixo. O termômetro 2, devido à posição de maior fluxo de névoa, obteve a maior efetividade de resfriamento. O termômetro 1, por não receber fluxo direto de névoa, embora numa menor distância do arrefecedor (4 m), obteve valor de efetividade igual a 54%, valor de temperatura superior ao termômetro 3, que estava a 11 m do arrefecedor.

Tabela 7 – Resultados de efetividade de resfriamento (dia 2)

Termômetro 1	54,1%
Termômetro 2	60,2%
Termômetro 3	44,7%
Termômetro 4	24,9%

4. CONCLUSÕES

O arrefecedor industrial utilizado mostrou-se eficaz na redução de temperatura do ambiente estudado, o qual possui dimensões de volume significativas (17,0 x 6,8 x 3,9 m,

o que corresponde a um volume de 450,16 m^3). Vale ressaltar que as janelas, na parte superior do laboratório, ficavam abertas a fim de liberar o vapor aquecido gerado no arrefecimento das gotículas de água presentes no fluxo de névoa. O delta máximo de redução de temperatura obtido foi de 6ºC, o que está de acordo com a literatura na área.

A umidade relativa do ambiente mostrou-se fundamental na eficiência do arrefecimento, em que quanto maior a umidade relativa menor é o potencial de resfriamento, uma vez que as condições, neste caso, se aproximam mais da condição de saturação (umidade relativa de 100%), que correspondem ao ponto de máximo resfriamento.

Os resultados experimentais mostraram que a direção do fluxo de névoa do arrefecedor é fundamental para o arrefecimento local do ambiente, uma vez que, nos experimentos realizados, a menor redução de temperatura foi obtida na posição que recebia o maior fluxo direto de névoa. As posições mais distantes do arrefecedor não apresentavam resfriamento tão significativos, uma vez que não recebiam toda a densidade de névoa das posições mais próximas, devido aos efeitos evaporativos, que levavam à perda de massa de água por evaporação para as camadas superiores do laboratório. Neste caso, a taxa de resfriamento é inversamente proporcional à distância do arrefecedor.

Os modelos polinomiais de segunda ordem foram capazes de representar o comportamento dos dados experimentais, principalmente, aqueles com menor umidade relativa, os quais apresentaram coeficientes de correlação maiores que 97%.

REFERÊNCIAS

[1] **ALMEIDA, I.M.G. ET AL.** *Análise de Viabilidade da Aplicação do Resfriamento Evaporativo no Estado do Rio Grande do Norte.*. IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica, Belém, 2009.

[2] **CAMARGO, J.R.** *Resfriamento Evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente.* Rev. Ciências Exatas, Taubaté, v.9/10, n. 1-2, p. 69-75, 2004.

[3] **ELIAS, R.B.** *Estudo Experimental de um Resfriador Evaporativo Ciclônico.* Tese de Mestrado, Faculdade de Eng. Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

[4] **FARNHAM, C.; ZHANG, L.; YUAN, J. ET AL.** *Measurement of the evaporative cooling effect: oscillating misting fan.* Building Research & Information, v.45/7, p. 783-799, 2017. *https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1278651*

[5] **SILVA, P.A.S.F.** *Simulação Numérica e de Campo para Avaliação de um sistema por Resfriamento Evaporativo em uma Praça de Alimentação.* Projeto de graduação em Eng. Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

[6] **SILVA, T.L.; ALMEIDA, V.C.** *Influência do calor sobre a saúde e desempenho dos trabalhadores.* IV Simpósio Maringaense de Engenharia de Produção, Maringá, 2010.

[7] **ULPIANI, G.; PERNA, C.; ZINZI, M.** *Mist cooling in urban spaces: Understanding the key factors behind the mitigation potential.* Thermal Eng., v.178, p. 115644, 2008. *https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115644*

[8] **WINGE, B.B.** *Determinação Experimental dos Coeficientes de Transferência de Calor e Massa para Painéis Evaporativos.* Projeto de graduação em Eng. Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

[9] **YAMADA, H.; YOON, G.; OKUMIYA, M. ET AL.** *Study of cooling system with water mist sprayers: Fundamental examination of particle size distribution and cooling effects*. Buid. Simul., v.1, p. 214-222, 2008. *https://doi.org/10.1007/s12273-008-8115-y*

Capítulo 14

The transition from naphtha to natural gas as a feedstock in the brazilian petrochemical industry: challenges and opportunities

Antônio Lázaro Lobo de Almeida
João Ricardo de Andrade Machado
Verona Silva Benevides
Ronaldo Costa Santos

Abstract: The Brazilian petrochemical sector is undergoing a restructuring process driven by economic, environmental, and technological pressures that demand higher production efficiency and alignment with decarbonization targets. In this context, substituting naphtha with natural gas as a feedstock emerges as a strategic alternative to enhance industrial competitiveness and reduce vulnerabilities associated with the volatility of petroleum-derived markets. This exploratory study, based on an integrative literature review, analyzed twenty publications—including scientific articles, technical reports, institutional briefs, and government documents—produced between 2010 and 2025. The findings indicate that the expansion of natural gas supply, regulatory liberalization, and infrastructure development are central factors enabling this transition. Recent literature highlights that natural gas offers economic advantages, particularly due to greater price stability and lower emission intensity compared to naphtha. Nevertheless, significant barriers remain, including logistical constraints, the need for substantial investments in industrial plants, and regulatory challenges that delay its widespread adoption. It is concluded that the shift toward natural gas is technically promising and environmentally advantageous; however, its consolidation within the Brazilian petrochemical industry requires consistent industrial policies, regulatory certainty, and the expansion of transportation and distribution networks.

Keywords: Petrochemical Feedstock Transition, Natural Gas Competitiveness, Energy Transition and Decarbonization, Industrial Sustainability

1. INTRODUCTION

Naphtha plays a central role in the petrochemical industry, primarily because it produces light olefins such as ethylene and propylene, which are regarded as “fundamental building blocks for the synthesis of polymers and other chemical compounds” (Gholami, 2021).

Through the fractional distillation of crude oil, naphtha is obtained as a complex mixture of hydrocarbons—paraffinic, cycloparaffinic, and aromatic—typically boiling in the range of approximately 20 °C to 220 °C. This broad thermodynamic range reflects its heterogeneous and complex nature. According to Silva et al. (2015), naphtha consists of hundreds of compounds within the C_4–C_{15} range, predominantly paraffins, isoparaffins, and naphthenes.

Naphtha is extensively employed in the steam cracking process, in which it undergoes thermal decomposition to produce light olefins (such as ethylene and propylene) as well as aromatic compounds (benzene, toluene, and xylene), which are considered “essential components for the dynamics of the petrochemical value chain” (Ren et al., 2022).

In the Brazilian context, the predominance of naphtha as a petrochemical feedstock is well established. Data from the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP, 2023) indicate that most domestic ethylene production is still based on this petroleum derivative. Braskem, the leading producer of thermoplastic resins in the Americas, corroborates this scenario by reporting that approximately 78% of its ethylene production comes from naphtha, significantly exceeding that from alternative feedstocks such as natural gas and ethanol (Química e Derivados, 2023).

According to Santos, Peyerl, and Netto (2020), incorporating natural gas into the Brazilian petrochemical sector is an important strategy to reduce dependence on naphtha, with the potential to influence both the competitiveness of the national chemical industry and the production of basic petrochemical inputs. This movement aligns with a global trend toward greater energy efficiency and reduced environmental impacts. Pereira (2021) emphasizes that natural gas is a cleaner and more efficient alternative to naphtha, thereby reducing carbon dioxide (CO_2) emissions and other atmospheric pollutants.

Beyond its environmental advantages, natural gas also offers significant potential to improve productivity and reduce operating costs. According to the International Energy Agency (IEA, 2022), its use as a petrochemical feedstock can increase production efficiency by up to 20% compared to naphtha, particularly in processes focused on light olefin production. Similarly, the Institute for Industrial Development Studies (IEDI, 2023) highlights that “the use of natural gas in industrial activities can serve as a lever for reducing operating costs, provided that competitive supply conditions and adequate regulatory access are ensured.”

Despite this potential, structural challenges continue to hinder the consolidation of this transition in Brazil. Souza and Mendes (2020) argue that “the insufficient infrastructure for transporting natural gas from pre-salt fields to petrochemical hubs reduces the competitiveness of this feedstock and constrains industrial expansion.” Moreover, the long-term sustainability of the sector depends on adopting practices that mitigate environmental impacts, particularly greenhouse gas emissions, in line with the country's international commitments (IBAMA, 2021).

In light of this scenario, it is essential to analyze the challenges and opportunities associated with reconfiguring the feedstock matrix in the Brazilian petrochemical industry, particularly amid the expanded use of natural gas. Accordingly, the guiding

question of this study is to understand the key barriers and potential benefits that companies in the sector face during the transition to natural gas as the primary feedstock. The general objective is to examine these elements and highlight the impacts of this transformation on industrial sustainability and competitiveness. Exploratory and analytical in nature, this study seeks to understand how companies can adapt to this structural change, promoting greater energy, environmental, and productive efficiency.

Thus, this work contributes to the broader debate on modernizing the energy and feedstock matrix of the Brazilian petrochemical industry, elucidating both the potential benefits of adopting natural gas and the technological, logistical, and environmental challenges that must be overcome.

2. METHODOLOGY

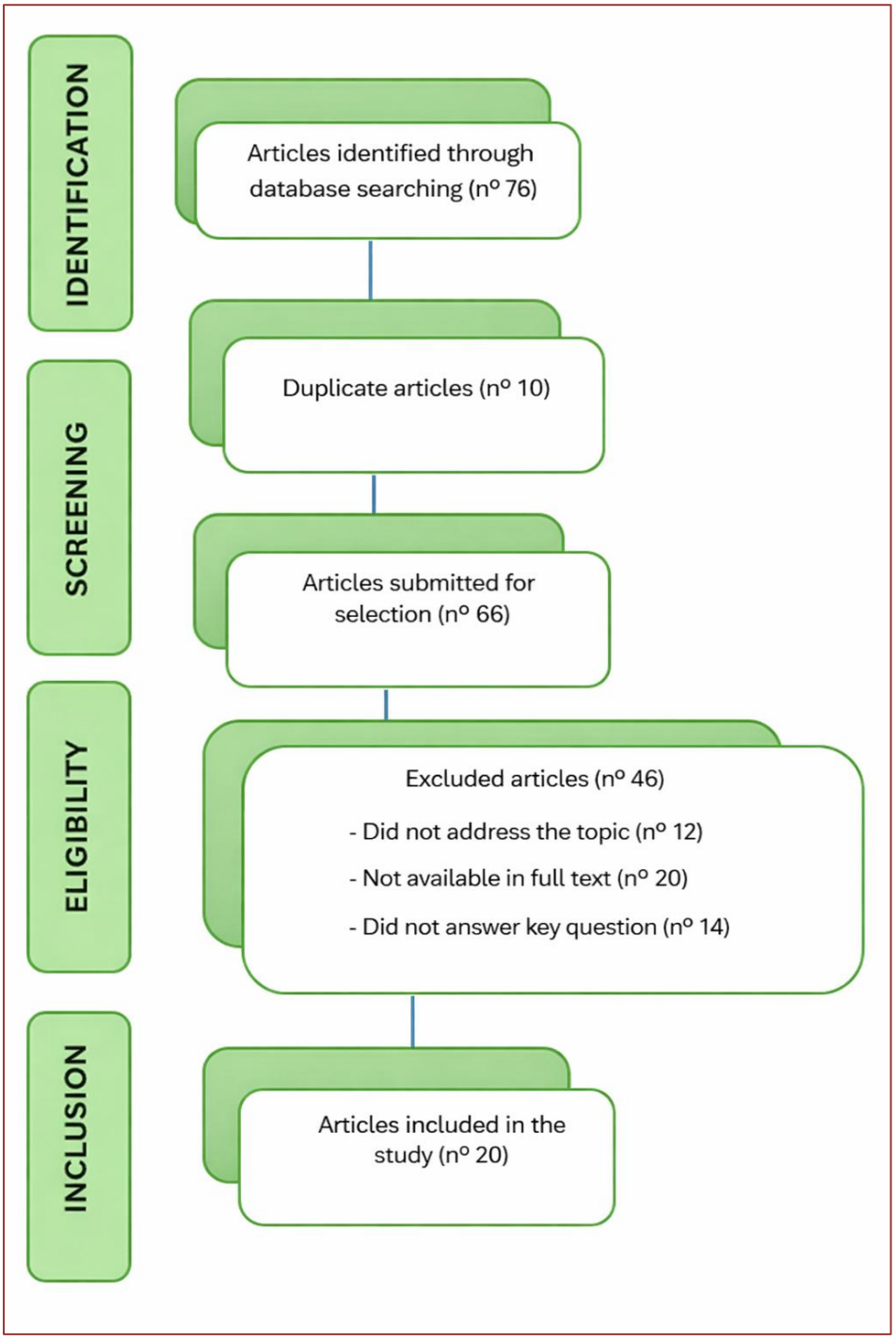
The literature review underpinning this research was conducted between August and November 2025 and encompassed books, technical manuals, and scientific articles published over the past few decades. The selected materials were chosen based on thematic relevance, methodological rigor, and currency. In total, twenty studies were analyzed, constituting an integrative review. This approach enables the identification, evaluation, and synthesis of existing knowledge on a given topic, thereby fostering a comprehensive understanding and supporting strategic reflections on the transition from naphtha to natural gas.

To construct the theoretical framework, legislation and official documents from the Ministry of Mines and Energy (MME), the Brazilian Chemical Industry Association (ABIQUIM), and the National Confederation of Industry (IEL) were consulted, in addition to books and scientific articles retrieved from the Scientific Electronic Library Online (SciELO) and Google Scholar databases. The search process employed controlled descriptors from the Thesaurus of Art & Architecture (TAA)—namely “industry,” “petrochemical,” “feedstocks,” “naphtha,” and “natural gas”—with support from the Centro de Documentações de Bienes Patrimoniales.

Following the identification of materials in the selected databases, inclusion criteria were applied, encompassing full-text availability, thematic relevance, methodological adequacy, and electronic access. Studies published in Portuguese, English, and Spanish were considered, with a temporal scope prioritizing recent research. Exclusion criteria included removing duplicate articles and publications whose abstracts did not directly relate to the study objective.

The selection and organization of studies followed the recommendations of the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) checklist, an internationally recognized set of guidelines designed to ensure transparent reporting of the review process, including search strategies, eligibility criteria, risk-of-bias assessment, and synthesis of results. Figure 1 presents the PRISMA flow diagram detailing the stages of study identification, screening, eligibility, and inclusion. The application of this model, combined with a structured checklist, enhanced the clarity, reproducibility, and scientific reliability of the bibliographic survey.

Figure 1 – Identification and selection of studies based on the PRISMA recommendations.



The selection of articles was conducted in two stages. In the first stage, data identification was performed through an exploratory reading of the abstracts of each retrieved article. Subsequently, the second stage consisted of the analytical phase, which involved study selection, application of eligibility criteria, in-depth analysis, and discussion to establish coherence with the research objectives. At this stage, the studies were systematically filtered, and the relevant information was organized and synthesized.

The data were categorized and discussed in accordance with the objectives of the integrative review. To interpret the collected material and to confirm or refute the research assumptions, a thematic categorical data analysis technique was applied. This approach aims to "identify the cores of meaning that constitute a communication, whose presence or frequency carries significance for the intended analytical objective," and was employed in an interpretative rather than a statistical manner.

According to Braun and Clarke (2019), this analytical pathway requires both methodological rigor and researcher reflexivity, in which analytical decisions must be carefully documented and the internal coherence of the generated categories ensured. This updated perspective reinforces the notion that thematic analysis is an iterative process of organizing and interpreting messages, building on the foundational understanding established by classical authors in the field.

Following the bibliographic search in the SciELO and Google Scholar databases using the descriptors, 76 articles were initially identified. After applying the exclusion criteria, 20 articles were selected for analysis. In addition to these scientific publications, the study examined relevant Brazilian legislation, technical manuals, and institutional documents issued by the Ministry of Mines and Energy (MME), the Brazilian Chemical Industry Association (ABIQUIM), and the National Confederation of Industry (IEL).

3. LITERATURE REVIEW

3.1. THE ECONOMIC IMPACT OF THE TRANSITION FROM NAPHTHA TO NATURAL GAS IN THE BRAZILIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY

The Brazilian petrochemical industry plays a strategic role in the national economy by supplying essential inputs to a wide range of manufacturing sectors, including plastics, fertilizers, and synthetic fibers (Banco do Nordeste do Brasil, 2019). The production of these inputs sustains not only complex value chains but also industrial growth and job creation, consolidating the sector as a relevant pillar of the country's economic structure (ABEQ, 2021).

Historically, naphtha has been the primary feedstock of the Brazilian petrochemical industry due to its versatility and its ability to generate a broad spectrum of products (Meirelles, 2014). However, the external dependence on this feedstock has contributed to trade deficits and exposed the sector to exchange rate volatility, since naphtha and other petroleum derivatives are priced in U.S. dollars. The appreciation of the U.S. currency against the Brazilian real increases import costs, thereby undermining the competitiveness and economic sustainability of petrochemical companies (DIEESE, 2018; Lira Júnior, Borschiver, Oroski, 2016).

Natural gas is recognized as one of the most relevant fossil fuels in the global energy matrix. It is technically defined as "a mixture of light hydrocarbons, predominantly methane (CH_4), accompanied by variable fractions of ethane, propane, butanes, and non-hydrocarbon components," such as nitrogen and carbon dioxide (Sacramento, 2023). Several studies emphasize that "methane constitutes the main component of natural gas, generally exceeding 85% by volume, although this variability depends on the geological origin of the reservoir" (Sloan & Koh, 2021). Similarly, Ridha et al. (2022) highlight that the presence of ethane, propane, and butanes plays a fundamental role in determining calorific value and suitability for petrochemical routes.

The typical composition of natural gas reflects specific geological characteristics, with methane "typically accounting for 70–90% of the total hydrocarbon content" (Sacramento, 2023), ethane ranging from 3% to 10%, propane from 1% to 3%, and butane around 0.5%. Complementing this perspective, Romano et al. (2020) note that "trace fractions of carbon dioxide, nitrogen, and sulfur compounds may be present and require removal and conditioning processes before industrial utilization." Although present at low concentrations, these minor components directly influence processing stages, corrosivity, and overall energy efficiency.

The literature increasingly highlights the role of natural gas as a relevant petrochemical feedstock due to its ethane and propane content, which are essential for the production of ethylene and propylene via steam cracking. As noted by Li et al. (2023), "the expansion of ethane-rich natural gas supply has reconfigured competitive strategies of petrochemical clusters, particularly in North America and the Middle East." This trend has begun to influence South American industrial dynamics as well, since the availability of these fractions alters cost structures, technological pathways, and the sector's overall energy efficiency (Costa & Ribeiro, 2021).

Naphtha, in contrast, is a liquid fraction derived from petroleum refining, composed predominantly of hydrocarbons in the C_5–C_{12} range, including paraffins, isoparaffins, olefins, naphthenes, and aromatic compounds (Joo et al., 2023). Its liquid nature and high energy density, combined with a more complex molecular structure, confer industrial properties that differ substantially from those of natural gas. From a petrochemical standpoint, naphtha has traditionally been the primary feedstock for steam cracking units that produce heavier olefins and aromatics (GPCA, 2023). By contrast, natural gas—particularly ethane—enables more selective routes for ethylene production, offering higher energy efficiency and lower emissions per ton of product (Deloitte, 2023).

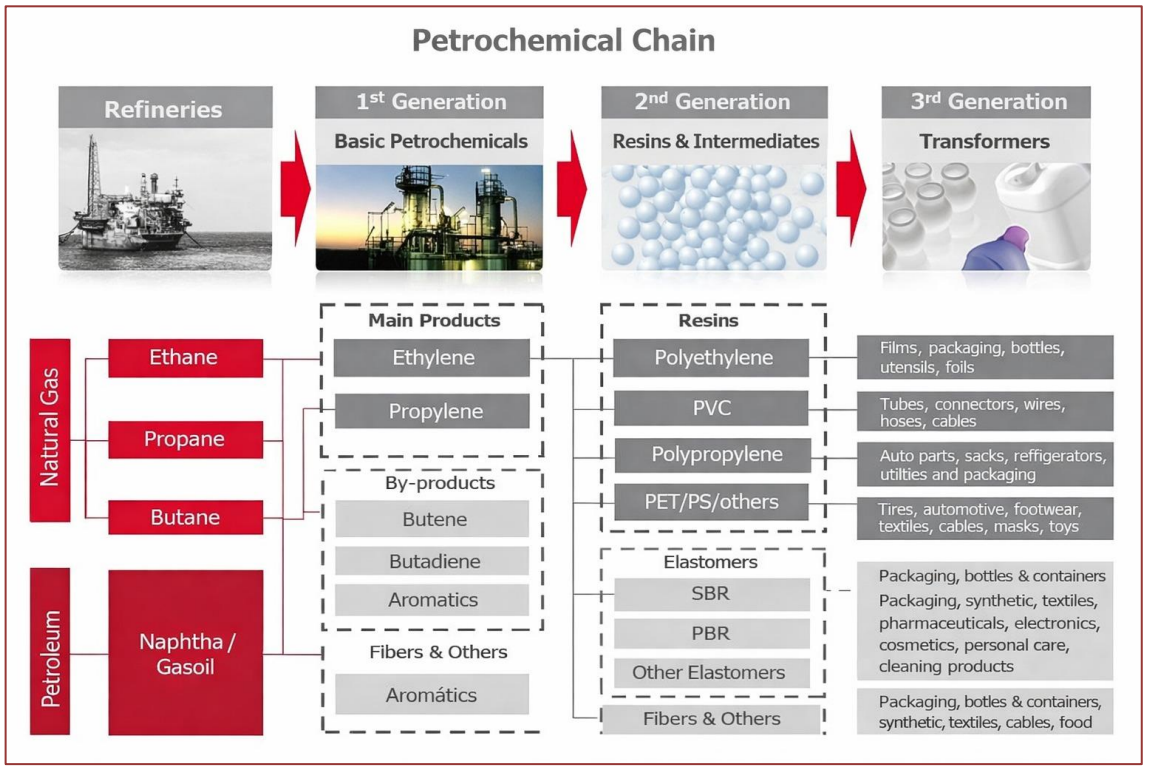
With respect to costs, the competitiveness of naphtha-based versus ethane-based value chains has increasingly favored the ethane-based value chain. Recent studies indicate that variable production costs for ethane-based steam crackers are significantly lower than those for naphtha-based units, particularly in the United States, where ethane benefits from a structural cost advantage relative to naphtha (Business Chemistry, 2023). Furthermore, refinery–petrochemical integration tends to favor the use of ethane, as it is often priced lower or indexed to natural gas. In contrast, naphtha prices remain closely linked to crude oil markets (GPCA, 2023).

From an environmental perspective, naphtha presents notable disadvantages compared to natural gas. The combustion and cracking processes associated with naphtha generally result in higher CO_2 emissions per unit of ethylene produced than routes based on lighter gaseous feedstocks, especially when carbon pricing mechanisms or emission costs are considered (Business Chemistry, 2023). In regulatory terms, feedstock consumption intensity also has implications: according to an ANP report, producing one metric ton of ethylene requires approximately 3.5 tons of naphtha, compared to only 1.3 tons of ethane, reinforcing the environmental advantage of lighter feedstocks under certain assumptions (ANP, 2023).

According to the International Energy Agency (IEA, 2021), the transition toward natural gas entails substantial capital investments in energy infrastructure. However, the report does not explicitly address the need for new petrochemical crackers or retrofitting of existing units. This transition also affects product portfolios. As illustrated in Figure 2, while naphtha enables a more diversified output of olefins and aromatics, natural gas-

based routes are predominantly focused on the production of light olefins, such as ethylene and propylene, which may constrain the supply of strategic intermediates for resin and fiber value chains (Jiang et al., 2023; EPE, 2018).

Figure 2 – Management of the petrochemical industry production chain.



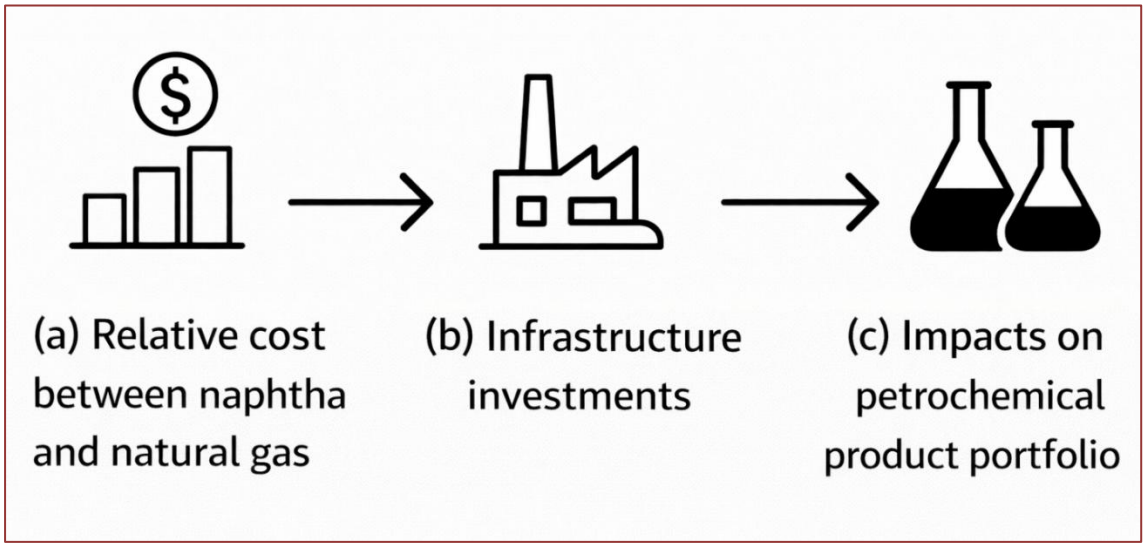
The petrochemical industry's production chain is structured into three main production generations. The first generation comprises the production of basic petrochemicals—such as ethylene, propylene, butenes, and aromatic compounds—obtained by cracking naphtha or natural gas. These basic chemicals constitute the foundation for the synthesis of chemical intermediates and polymers used in subsequent stages of the value chain (EPE, 2023).

In the second generation, inputs from the previous stage are converted into resins and intermediates—including polyethylene, PVC, PET, polystyrene, and elastomers—essential materials for the manufacturing industry. The third generation encompasses downstream processors, responsible for producing final goods such as packaging, household utensils, automotive parts, electronic components, textiles, and a wide range of consumer products (CNI, 2022).

Another critical factor in this transition is infrastructure. The lack of adequate gas pipelines and terminals for transporting natural gas from the pre-salt fields to Brazilian petrochemical hubs undermines the competitiveness of this feedstock (CCGMNP, PUC-RIO, 2021; MME, 2023). As illustrated in Figure 3, the expansion of transportation and storage networks will be decisive for enabling feedstock substitution on a national scale.

Therefore, the economic analysis of the transition from naphtha to natural gas must be grounded on three fundamental pillars.

Figure 3 – Pillars of the transition from naphtha to natural gas.



The first pillar (a) refers to the relative cost between naphtha and natural gas, a decisive element in assessing the economic feasibility of the transition, particularly when exchange-rate variations and fluctuations in international crude oil prices are considered. Studies indicate that "feedstock costs account for between 40% and 60% of total petrochemical production costs" (Maximize Market Research, 2023). Consequently, the choice between naphtha and natural gas as a feedstock is linked to the global dynamics of oil versus natural gas markets (OECD, 2018; GPCA, 2023). In this context, the literature consistently points to a competitive advantage for gas-based feedstocks, as "gas-based feedstocks offer a competitive advantage" over naphtha in several regional markets (Gelder, 2023).

The second pillar (b) encompasses investments in infrastructure, which are indispensable for technological adaptation, the installation of new cracking units, and the expansion of gas pipeline networks and export or distribution terminals. This dimension is particularly critical for countries seeking to substitute naphtha with natural gas, as existing infrastructure has historically been designed to handle liquid petroleum fractions. As reported in recent analyses, "efficient petrochemical operations depend not only on the feedstock itself, but also on the infrastructure for natural gas transportation and storage" (Invest Alberta, 2024).

The third pillar (c) addresses the impacts on the petrochemical product portfolio, since changes in feedstock directly affect both the diversity and yields of the products obtained, thereby influencing industrial competitiveness and sectoral diversification (Rezende, 2017). The replacement of naphtha with natural gas tends to reduce aromatics production, which is essential for resin and fiber manufacturing, while increasing light olefin output, such as ethylene and propylene (Plastemart, 2023). This shift in the product slate illustrates that "feedstock selection simultaneously influences both the scale and the composition of derivatives obtained in the cracking process" (Wijanarko et al., 2023), underscoring the importance of strategic planning in the organization and integration of petrochemical value chains.

3.2. ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL AND INNOVATION CHALLENGES ASSOCIATED WITH THE SUBSTITUTION OF NAPHTHA BY NATURAL GAS IN THE BRAZILIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY

The growing adoption of natural gas and its fractions—such as ethane, propane, and butane—by the Brazilian petrochemical industry represents a strategic opportunity to reduce operating costs and carbon intensity. However, it requires a complex process of technological innovation and productive reorganization. While naphtha still accounts for a significant share of ethylene production, a gradual diversification toward ethane- and propane-based routes has been observed (EPE, 2022). From a technological standpoint, one of the main challenges lies in adapting cracking units. Plants originally designed for naphtha operate under thermal regimes, pressures, and kinetic profiles that differ from those optimal for ethane or propane, thereby requiring modifications to furnaces, heat exchangers, fractionation trains, and byproduct recovery systems, as well as adjustments in materials to withstand new operating conditions. Moreover, recent studies emphasize that a robust domestic natural gas market is a prerequisite for this transition (EPE; ABIQUIM, 2025).

In parallel, new technological pathways are emerging. Oxidative dehydrogenation of ethane (ODH), for instance, has become the subject of intensive research. A recent study proposed the use of packed-bed membrane reactors optimized through multicriteria decision-making techniques to maximize ethylene selectivity while improving energy efficiency (Nabavi, Wang & Rodríguez, 2024). As observed by Mallapragada et al. (2023), the direct electrification of process heating "offers a high-potential technological pathway with relatively low capital costs" for decarbonizing heat-intensive chemical industries.

The technical and review literature identifies two main vectors: (i) direct electrification of furnaces and high-temperature process sections, such as electrically heated cracking furnaces or electrified rotating reactors; and (ii) the integration of flexible electrical systems—including batteries, thermal energy storage, and microgrids—to match industrial demand with the variable supply of renewable electricity. Reviews and case studies (TNO, 2022; Tiggeloven et al., 2023) indicate that although electrification can significantly reduce site-level Scope 1 emissions, the net climate benefit depends strongly on the electricity mix and life-cycle balance. In summary, renewable electricity lowers the process's carbon intensity, whereas electricity from fossil-based mixes may yield limited reductions or even increased life-cycle impacts.

Furthermore, recent techno-economic assessments and life-cycle analyses report promising yet conditional results. Modeling and LCA studies demonstrate that electrification of cracking processes can reduce CO_2 emissions per ton of product when combined with additional renewable generation, thermal storage systems that enable load shifting, and improvements in reactor efficiency (Layritz et al., 2021).

Nevertheless, the transition also requires robust logistical infrastructure. Ensuring a stable supply of ethane (or other light fractions) requires dedicated pipelines, processing terminals, storage facilities, and port infrastructure for imports. A recent study by EPE and ABIQUIM (2025) specifically examined ethane availability in the domestic market and identified viable price ranges for petrochemical use.

From an economic perspective, ethane has become increasingly competitive. Braskem, for example, has been investing in increasing the share of ethane in its feedstock mix, in line with its strategy to reduce costs and enhance competitiveness (Bridi, 2025). In addition,

the company has confirmed the renewal of supply contracts with Petrobras for ethane and propane, signaling confidence in future availability (Braskem, 2025).

Despite these advantages, structural limitations persist. Analyses of the Brazilian petrochemical value chain indicate that high domestic natural gas prices undermine the attractiveness of ethane for petrochemical applications (Santos, 2021). This imbalance between domestic pricing and industrial demand calls for regulatory and contractual solutions to render the transition economically viable. At the institutional and organizational levels, the transition requires not only investments in physical assets but also workforce upskilling, new supply contract models, adapted maintenance practices, and corporate governance frameworks for risk management. Without coordination among companies, regulators, and industrial policies, there is a risk that fragmented investments will fail to promote a systemic transformation of the petrochemical sector (EPE; ABIQUIM, 2025).

From an environmental standpoint, the partial substitution of naphtha with natural gas can reduce carbon intensity; however, the magnitude of these gains depends on the full life cycle, from gas production to its use in cracking processes. Recent life-cycle assessments of alternatives to conventional ethylene production suggest that maximizing climate benefits requires hybrid pathways involving carbon capture, renewable-based process heating, and electrified operations (Zanon-Zotin et al., 2023).

Another critical issue concerns the cost of natural gas in Brazil. According to data from Sindiquímica-BA, although the country possesses significant reserves, “the national industry pays approximately US$ 12.4/MMBTU (million British thermal units), whereas the same gas is sold for around US$ 1.5/MMBTU in the United States, US$ 8.6/MMBTU in Europe, and US$ 6.2/MMBTU at the Bolivia–Brazil border” (Sindiquímica, 2024). This disparity compromises the competitiveness of natural gas as a feedstock, even when it is theoretically more efficient and less polluting. Additional pressure arises from international markets, as petrochemical products—particularly plastic resins—from the United States and China have entered the Brazilian market at lower prices, compressing domestic industry margins. In response, protective measures, such as higher import tariffs and antidumping investigations, have been proposed to safeguard the sector (Braskem, 2025a).

Finally, the transition requires a regulatory environment conducive to investment, with clear rules for infrastructure access contracts, capacity allocation, and incentives for research and development (R&D) in processes and materials. The enactment of the New Gas Law and related public policy documents represents progress by fostering more competitive market conditions; however, their effectiveness depends on implementing mechanisms that ensure predictable pricing and access to infrastructure for non-energy uses of natural gas as a feedstock (ANP, 2020).

In summary, the transition toward expanded use of natural gas as a petrochemical feedstock is a systemic process that demands technological advances, new contractual arrangements, coordinated public policies, and market adaptations. Only through sustained investments in R&D, regulatory improvements, expansion of logistical infrastructure, and aligned corporate strategies will it be possible to translate this transition into operational gains and sustainable economic outcomes (Rezende, 2017).

3.3. INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL AND SUSTAINABILITY ASPECTS OF THE SHIFT FROM NAPHTHA TO NATURAL GAS AS A FEEDSTOCK

Figure 4 illustrates that the expanded use of natural gas as a feedstock in the petrochemical industry has emerged as one of the most relevant strategies within the broader context of the energy transition and the pursuit of greater industrial sustainability. This shift presents substantial potential to significantly reduce environmental impacts while enhancing the efficiency of production processes. According to Pereira (2021), the energy transition constitutes one of the central pillars of global industrial restructuring and is essential for aligning economic growth with climate and environmental targets.

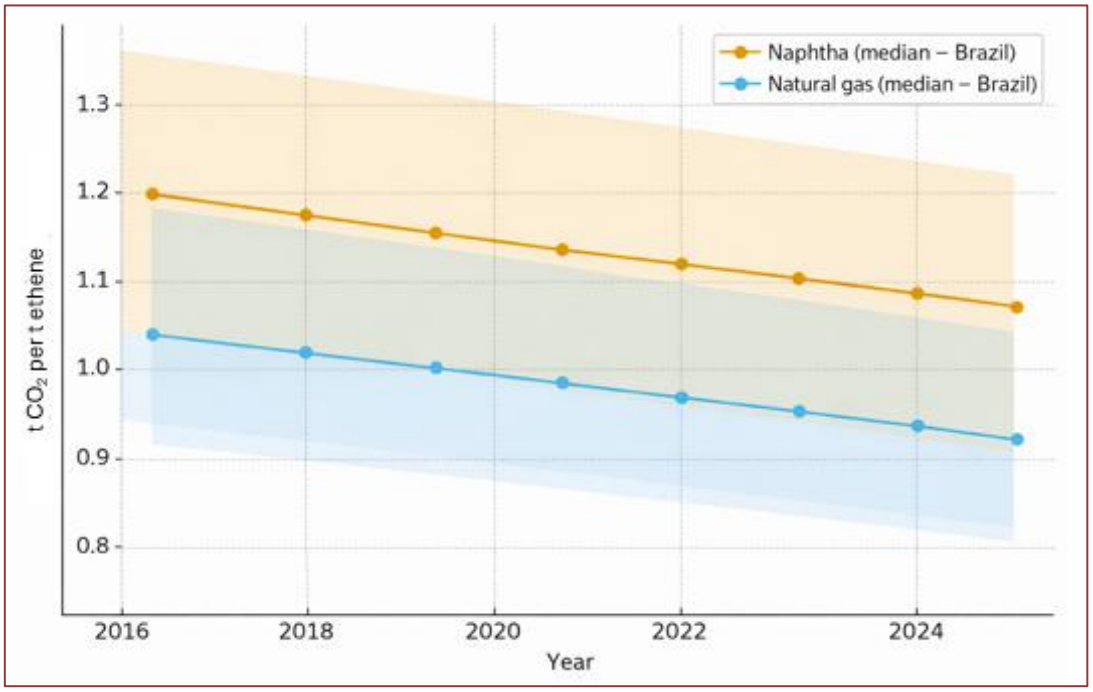
From an environmental standpoint, substituting naphtha with natural gas is associated with lower greenhouse gas (GHG) emissions per unit of product, primarily due to the lower carbon-to-hydrogen ratio of natural gas and its higher conversion efficiency in petrochemical processes. Gas-based processes—particularly those relying on ethane—tend to generate fewer CO_2 emissions during cracking and downstream operations when compared to naphtha-based pathways, especially when evaluated on a per-ton-of-olefin basis. These characteristics position natural gas as a transitional feedstock that can support decarbonization efforts in hard-to-abate industrial sectors.

Moreover, the adoption of natural gas contributes to improved energy efficiency, as lighter hydrocarbons require less severe cracking conditions, resulting in lower coke formation and reduced energy demand in furnaces. When combined with complementary measures—such as process electrification, heat integration, and the use of renewable electricity- the environmental benefits of gas-based petrochemical routes can be further amplified. However, the magnitude of these gains depends on a life-cycle perspective that accounts for upstream emissions associated with gas production, processing, and transportation.

In the Brazilian context, sustainability outcomes are also influenced by infrastructure availability, methane leakage control, and regulatory frameworks governing emissions. While natural gas offers a clear advantage over naphtha in terms of direct process emissions, uncontrolled fugitive methane emissions along the supply chain may offset part of these benefits if not properly managed. Therefore, robust monitoring, reporting, and mitigation strategies are essential to ensure that the transition delivers net environmental gains.

Overall, the literature indicates that the shift from naphtha to natural gas represents an environmentally favorable pathway for the petrochemical industry, particularly as an intermediate step toward deeper decarbonization. Its contribution to sustainability is maximized when integrated with broader energy-transition strategies, including renewable energy deployment, carbon capture and storage, and continuous improvements in process efficiency.

Figure 4 – Comparison of greenhouse gas (GHG) emissions between naphtha and natural gas from 2016 to 2025.



From an environmental perspective, the expanded use of natural gas as a petrochemical feedstock is associated with a significant reduction in greenhouse gas (GHG) emissions. Life Cycle Assessment (LCA) studies indicate that ethylene production routes based on natural gas emit, on average, between 0.12 and 0.18 tCO_2 less per ton of product than conventional naphtha-based routes (MCTI, 2023; SEEG, 2024). Although this differential is somewhat less pronounced in Brazil due to the predominance of hydropower in the national electricity mix, it nevertheless represents a meaningful advance toward meeting the emission mitigation targets established under the Paris Agreement and Brazil's Nationally Determined Contributions (NDCs) (MCTI, 2022).

Beyond economic and environmental benefits, the adoption of natural gas fosters technological modernization of the petrochemical sector, promoting cleaner, more efficient processes aligned with global sustainability practices (Chowdhury et al., 2021). Accordingly, the growing use of natural gas as a petrochemical feedstock extends beyond mere cost or emission reductions, consolidating itself as a long-term strategy to enhance sectoral resilience and strengthen the competitiveness of the Brazilian petrochemical industry in the context of a low-carbon economy (Rezende, 2017).

Natural gas offers clear advantages over naphtha, particularly with respect to greenhouse gas emissions and the reduction in atmospheric pollutant generation. As emphasized by the Federation of Industries of the State of Rio de Janeiro, "natural gas is a cleaner energy source, with lower emissions of CO_2 and other atmospheric pollutants compared to naphtha" (FIRJAN, 2023). According to Castro (2012), the combustion of natural gas produces significantly lower levels of sulfur oxides (SO_x), thereby reducing the potential for acid rain formation and improving air quality. However, nitrogen oxides (NO_x) emissions may still occur depending on operating conditions.

Nevertheless, the adoption of natural gas as a feedstock is not merely an input substitution, as it entails technical, economic, and regulatory challenges. Changes in feedstock composition require reconfiguring industrial plants, implementing technological adaptations, and making substantial investments in infrastructure. As highlighted by FIRJAN, "alterations in natural gas specifications may require significant investments in infrastructure and technological adaptations in petrochemical industries" (FIRJAN, 2023).

From a process perspective, producing aromatics such as benzene, toluene, and xylenes from natural gas remains technically challenging. Although alternative routes—such as methanol-to-aromatics—are available, their implementation is nontrivial and demands technological optimization to compete economically with naphtha-based pathways (Floudas et al., 2016).

From an economic standpoint, the Ministry of Mines and Energy notes that "changes in natural gas specifications may affect the competitiveness of the Brazilian petrochemical industry, particularly with respect to production costs and feedstock availability" (Ministério de Minas e Energia, 2020). This vulnerability is further exacerbated by dependence on external supply and international price volatility, reinforcing the need for long-term and coherent energy policies (IEA, 2022).

Therefore, the transition to natural gas as a feedstock in the petrochemical industry represents a strategic opportunity to advance a cleaner, more efficient energy matrix. However, this transformation requires integrated planning, consistent public policies, and sustained support for innovation. FIRJAN underscores that "it is essential for Brazil to develop a national strategy for the energy transition that encompasses energy source diversification and the modernization of the petrochemical industry" (FIRJAN, 2023). In this context, effective coordination among government authorities, the productive sector, and research institutions becomes crucial to consolidate sustainability and competitiveness in the global petrochemical landscape (Souza & Mendes, 2020; IBAMA, 2021).

4. RESULTS AND DISCUSSION

The main characteristics of the publications evaluated are presented in Figure 5, which summarizes the databases from which the documents were retrieved, the titles of the works, the years of publication, and their respective languages.

Figure 5 – Characteristics of the articles selected for inclusion in the study.

Title	Database / Source	Year	Reference
Evaluation of the expansion of natural gas as a bridge for the energy transition in Brazil	*Latin American Journal of Energy Research* / OJS UFES	2024	Barbosa, L. P.; Moura, L. G. M.; Barros Filho, A. K. D. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 5, n. 1, 2024.
Challenges of the natural gas market in Brazil as a driver of the energy transition and South American integration	*Tempo do Mundo* (IPEA)	2023	Brazil. Institute for Applied Economic Research (IPEA). *Tempo do Mundo*, Issue 32.
Comparison between naphtha- and ethanol-based routes for ethylene production: cost and CO_2 emission analysis (Dissertation)	*UFRJ Repository*	2019	Hombeeck, M. van. *Dissertação*, UFRJ, 2019.
Gas for development	*BNDES (Technical Report)*	2018	BNDES. *Gás para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro, 2018.
Report on natural gas specifications	*Federal Government (MME / MDIC)*	2020	Brazil. Ministry of Mines and Energy. *Relatório sobre especificação do gás natural*, 2020.
Refining and petrochemicals outlook in Brazil	*EPE (Technical Report)*	2018	EPE. *Panorama de Refino e Petroquímica no Brasil*. Rio de Janeiro, 2018.
Natural gas potential: a new cycle for petrochemicals in Rio de Janeiro	*FIRJAN / EPE*	2022	FIRJAN; EPE. *Potencial do Gás Natural*, Rio de Janeiro, 2022.
Fuel production and supply – opportunities in Brazil	*ANP (Institutional Publication)*	2017	ANP. *Fuel Production and Supply – Opportunities in Brazil*. Brasília, 2017.
Prospective studies on LPG supply, demand, and alternative uses of gas	*EPE (Technical Studies)*	2022	EPE. *Estudos prospectivos sobre oferta, demanda e usos do GLP*, 2022.
Working Group Report – Integration of the Natural Gas Sector and Industry	*MDIC / Federal Government*	2021	Brazil. MDIC. *Relatório do Grupo de Trabalho*, 2021.
Evaluating strategies for monetizing natural gas liquids	*Journal of Natural Gas Science and Engineering*	2022	Moreira dos Santos et al. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, v. 99, 104413.
The future of petrochemicals	*OECD / IEA (Global Report)*	2018	OECD. *The Future of Petrochemicals*. Paris, 2018.
A new scenario for the Brazilian petrochemical industry	*DIEESE (Technical Note)*	2018	DIEESE. *Nota Técnica*, 2018.
Naphtha no longer a competitive feedstock	*Argus Media*	2025	Argus Media. *Naphtha no longer competitive feedstock: Braskem*, 2025.
Role of oil & gas companies in the energy transition	*Corporate reports / media*	2023–2024	Braskem S.A. Corporate Reports and Communications.
Reports on ethane and NGL imports	*EPE / BNDES / Market News*	2024	BNDES. *Relatório Anual*, 2024.
Academic analyses on energy transition and the role of gas in Brazil	*Journals / Working Papers*	2021–2025	IEA. *Energy transition in the petrochemical sector*.
Policy briefs on prioritizing industrial use of natural gas	*Think tanks / NGOs*	2021–2024	WRI Brasil; Coalizão Energia Limpa.
Evaluating strategies for monetizing the natural gas supply in Brazil (PhD Thesis)	*COPPE/UFRJ Repository*	2021	Santos, R. M. dos. *PhD Thesis*, COPPE/UFRJ, 2021.

The analysis of the 20 selected documents—including scientific articles, technical reports, institutional notes, and government publications produced between 2010 and 2025—enabled the identification of consistent trends in the evolution of the feedstock matrix in the Brazilian petrochemical industry. The body of materials evaluated, originating from sources such as the Latin American Journal of Energy Research, IPEA, EPE, ANP, OECD/IEA, BNDES, COPPE/UFRJ, among others, provides technical, economic, and environmental evidence that supports an integrated understanding of this transformation process within the sector.

Most of the analyzed studies were published in Portuguese (n = 12; 60%), followed by English-language publications (n = 3; 15%) and bilingual studies (n = 5; 25%). No studies published exclusively in Spanish were identified. Regarding temporal distribution, a higher concentration of publications was observed in 2022 (n = 4; 20%), followed by 2023 (n = 3; 15%) and 2021 (n = 2; 10%), while the remaining years each accounted for one publication (n = 1; 5%).

Studies published since 2018 show a growing emphasis on the role of natural gas in the energy transition, highlighting its use as both a feedstock and an energy source across different segments of the petrochemical value chain. More recent scientific publications (2022–2024) particularly emphasize the potential expansion of natural gas supply in Brazil, driven by regulatory liberalization and infrastructure development—factors identified as essential for natural gas to become a competitive alternative to naphtha.

The integrated interpretation of the reviewed literature indicates that the transition from naphtha to natural gas in the Brazilian petrochemical industry is a strategic, multidimensional, and gradual process. Although significant advances have been achieved—such as increased feedstock availability, market-opening policies, and growing pressure for decarbonization- the analyzed documents consistently suggest that a complete replacement of naphtha is not feasible in the short term.

From an economic standpoint, there is a broad consensus among the reviewed studies that natural gas offers competitive advantages, particularly in terms of price predictability and reduced exposure to crude oil and exchange-rate volatility. Figure 6 illustrates this trend by comparing the average procurement costs of naphtha and natural gas, highlighting the potential reduction in operating costs associated with gas-based feedstocks.

Figure 6 – Average procurement cost of naphtha versus natural gas.

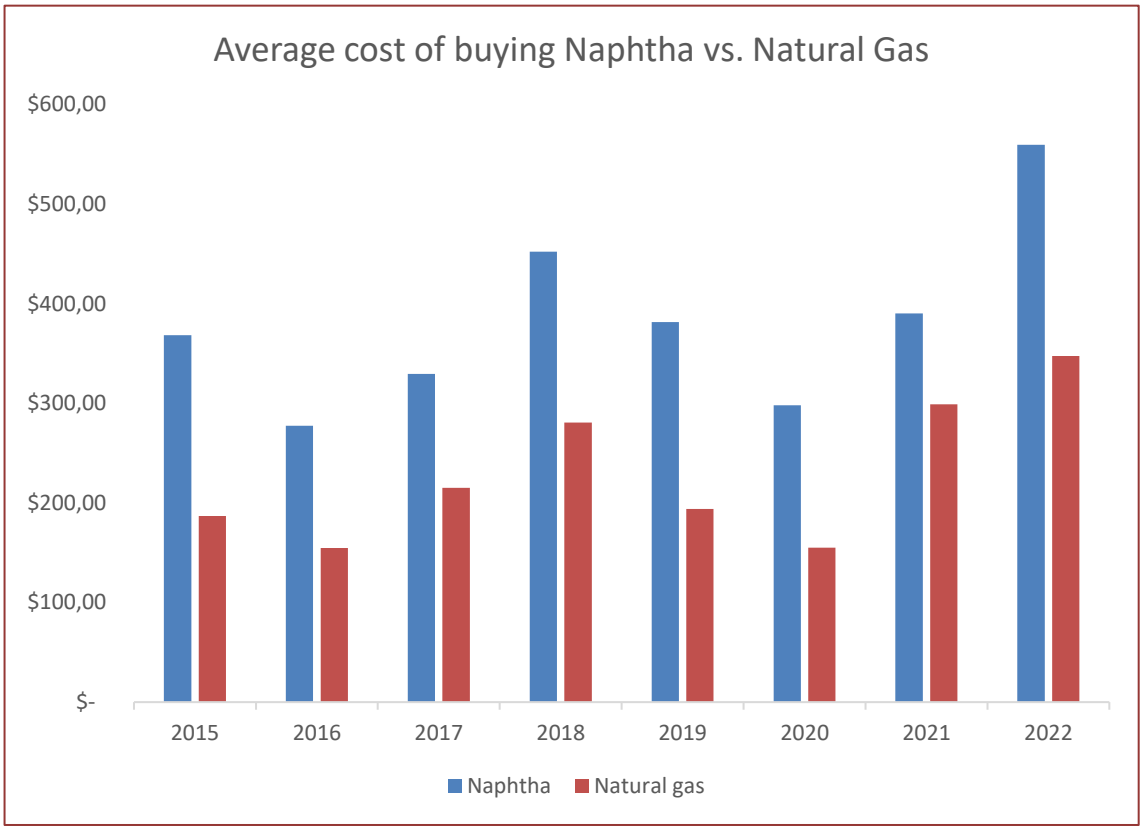


Figure 6 presents the evolution of the average FOB purchase cost of naphtha and natural gas from 2015 to 2022, enabling the identification of relevant trends for a comparative analysis of these two strategic feedstocks for the petrochemical industry. Overall, naphtha consistently trades at higher prices than natural gas throughout the period, reinforcing its greater sensitivity to fluctuations in international petroleum derivative markets. This gap is particularly pronounced in years such as 2017 and 2022, when naphtha experienced cost peaks that clearly exceeded those observed for natural gas.

The historical series also reveals cycles of price escalation and contraction, reflecting external dynamics such as variations in crude oil prices, geopolitical events, imbalances in global energy supply, and exchange-rate volatility. While naphtha exhibits more pronounced price fluctuations over time, natural gas shows greater stability, though it also registered notable increases in years such as 2018 and 2022. These increases are likely associated with rising domestic demand and volatility in the international liquefied natural gas (LNG) market.

The geographic distribution of production centers largely shapes Brazil's gas pipeline infrastructure. In the Northeast, gas flows originate primarily from offshore fields and are integrated with processing units and the Pecém LNG regasification terminal, enhancing regional supply security. In the Southeast—Brazil's largest concentration of installed industrial capacity—the presence of multiple gas processing units and strategic interconnections among states enables greater operational flexibility and route diversification. In the South, infrastructure expansion extends toward Rio Grande do Sul, including cross-border segments that facilitate integration with international gas systems.

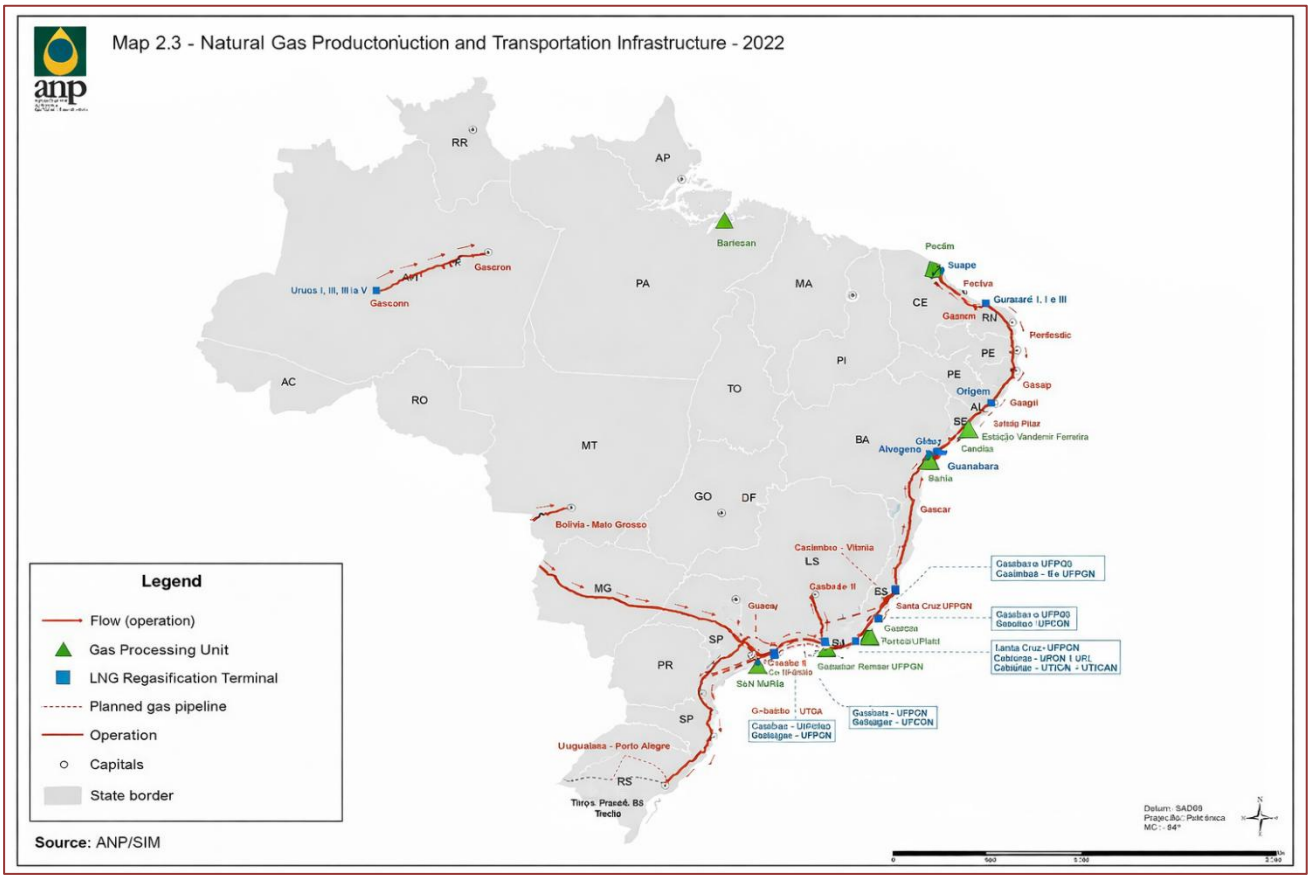
By contrast, the Northern region presents a more dispersed infrastructure with limited interconnection to the rest of the country. Operational routes are mainly associated with gas produced in Urucu, in the state of Amazonas, and are largely directed toward local consumption, with restricted connectivity to major demand centers. The mapping of the network also highlights planned pipeline projects, indicating ongoing efforts to expand the grid and reduce regional disparities, particularly in the Central-West and Northern axes.

Overall, the spatial distribution of infrastructure reflects both economic concentration and long-standing logistical constraints within the sector. Although the current network is relatively robust along the coast and in the Southeast, it remains asymmetric, with significant structural gaps in the country's interior. This configuration directly affects the competitiveness of natural gas as an energy and industrial feedstock, as it limits availability in regions distant from major production or import hubs. The analysis of the infrastructure map, therefore, underscores the need for further expansion of an integrated pipeline network to enhance energy security, reduce logistical costs, and broaden nationwide access to natural gas.

The environmental dimension emerges as one of the most consistent justifications for the sector's shift toward natural gas. International studies (OECD/IEA) and academic analyses converge in recognizing that the lower CO_2 emission intensity of natural gas aligns it with global energy transition trends and with increasing regulatory pressures in key markets such as Europe and Asia. Nevertheless, some literature emphasizes that natural gas should be viewed as a transitional resource rather than a definitive solution for achieving a fully sustainable industrial matrix.

Figure 7 highlights that the competitiveness associated with expanded use of natural gas remains strongly dependent on the expansion of logistical infrastructure. Reports from DIEESE, EPE, and ANP indicate that the concentration of gas along the coast and the limited availability of flexible supply contracts continue to constrain petrochemical companies' ability to reconfigure their production routes.

Figure 7 – Natural gas infrastructure and its role in the competitiveness of the petrochemical industry.



The Brazilian infrastructure for natural gas production, processing, and transportation in 2022 is well illustrated in Figure 7, which highlights the complexity and extent of the network that interconnects production areas, processing facilities, and major consumption centers. The national gas grid remains concentrated in the Southeast, Northeast, and South regions, where the industrial hubs with the highest demand are located. In these areas, operational pipelines form continuous corridors linking LNG regasification terminals, gas processing units, and delivery points to the transmission network, evidencing a relatively mature and integrated structure.

From a technological and productive standpoint, authors affiliated with UFRJ, IPEA, and FIRJAN/EPE emphasize that adopting natural gas requires adaptations in petrochemical plants, investments in processing units, and changes in supply-chain logic. Although technically feasible, these adjustments entail high costs and require long-term planning, which helps explain the continued predominance of naphtha as the sector's main feedstock.

The analysis of the twenty documents highlights the regulatory variable as a decisive factor in the context under study. The New Gas Law, government programs aimed at market liberalization, and energy integration guidelines represent important advances; however, their effectiveness depends on institutional consolidation, legal certainty, and the expansion of competition among suppliers. The reviewed documents converge in

indicating that, in the absence of these elements, the transition is likely to occur slowly and remain restricted to specific segments of the industry.

Accordingly, the overall discussion indicates that expanding the use of natural gas as a petrochemical feedstock is a technically promising and environmentally desirable pathway, albeit contingent on regulatory progress, structural investments, and consistent industrial policies. The analysis demonstrates that Brazil possesses the conditions and resources necessary to enable this transformation yet still faces structural barriers that must be overcome for natural gas to be consolidated as a predominant feedstock in the national petrochemical industry.

5. CONCLUSION

The analysis conducted demonstrates that the Brazilian petrochemical industry is undergoing a period of strategic redefinition driven by economic, environmental, and technological factors. The comparison between naphtha and natural gas as feedstocks indicates that, although naphtha continues to play a significant role due to historically consolidated production structures, natural gas stands out as a more competitive alternative and better aligned with contemporary demands for energy efficiency and reduced environmental impacts.

The reviewed studies indicate that the use of natural gas has the potential to increase petrochemical process productivity, reduce greenhouse gas emissions, and support Brazil's repositioning in the context of global energy transition trends. However, this shift is contingent upon structural conditions, including the expansion of processing and transportation infrastructure, regulatory stability, and the continuous availability of the feedstock at competitive prices.

In addition, the literature reinforces that diversifying the feedstock matrix is a strategic approach to minimizing vulnerabilities associated with exchange-rate volatility and fluctuations in international oil markets. For Brazil, which holds significant natural gas reserves, consolidating this transition may generate substantial economic gains, strengthen the productive value chain, and stimulate industrial innovation.

The competitiveness of the Brazilian petrochemical sector in the global landscape will depend on its ability to adapt to emerging environmental and technological requirements. Investments in infrastructure, coherent industrial policies, and regulatory certainty will be essential for the sector to progress toward a cleaner, more efficient feedstock matrix aligned with international sustainability practices. In this sense, the integration of natural gas, innovation, and strategic planning emerges as a promising pathway to modernize and long-term strengthen the Brazilian petrochemical industry.

REFERENCES

[1] ABIQUIM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. *Panorama da Indústria Química Brasileira*. São Paulo: ABIQUIM, 2021. Disponível em: https://abiquim.org.br/industriaQuimica. Acesso em: 21 set. 2025.

[2] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). *Transição energética no setor petroquímico: desafios e oportunidades*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021. Acesso em: 21 set. 2025.

[3] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). *World Energy Outlook 2021*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://www.iea.org. Acesso em: 8 nov. 2025.

[4] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). *World Energy Outlook 2022*. Paris: OECD/IEA, 2022. Disponível em: https://www.iea.org. Acesso em: 8 nov. 2025.

[5] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2020*. Rio de Janeiro: ANP, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/anp. Acesso em: 9 nov. 2025.

[6] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2024*. Rio de Janeiro: ANP, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/anp. Acesso em: 9 nov. 2025.

[7] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2025*. Rio de Janeiro: ANP, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp. Acesso em: 9 nov. 2025.

[8] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Boletim da Indústria do Gás Natural*. Rio de Janeiro: ANP, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp. Acesso em: 21 set. 2025.

[9] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Fuel Production and Supply – Opportunities in Brazil*. Brasília: ANP, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/anp. Acesso em: 15 nov. 2025.

[10] ARGUS MEDIA. *Naphtha no longer a competitive feedstock: Braskem*. London: Argus Media, 2025. Disponível em: https://www.argusmedia.com. Acesso em: 21 set. 2025.

[11] BARBOSA, L. P.; MOURA, L. G. M.; BARROS FILHO, A. K. D. Avaliação da expansão do gás natural como ponte para a transição energética no Brasil. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 5, n. 1, 2024. Disponível em: https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/43404. Acesso em: 15 nov. 2025.

[12] BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). *Gás para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: BNDES, 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br. Acesso em: 15 nov. 2025.

[13] BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). *Relatório Anual 2024*. Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: https://www.bndes.gov.br. Acesso em: 21 nov. 2025.

[14] BRAUN, V.; CLARKE, V. Reflecting on reflexive thematic analysis. *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health*, v. 11, n. 4, p. 589–597, 2019. DOI: 10.1080/2159676X.2019.1628806.

[15] BRASKEM S.A. *Relatórios e Comunicações Corporativas (2023–2024)*. São Paulo: Braskem, 2024. Disponível em: https://www.braskem.com.br. Acesso em: 15 nov. 2025.

[16] CHOWDHURY, M. A. H. et al. Life cycle assessment studies of ethylene production: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123146.

[17] DELOITTE. *Building resilience in petrochemicals: changing feedstock dynamics*. Deloitte Insights, 2023. Disponível em: https://www.deloitte.com. Acesso em: 16 nov. 2025.

[18] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Panorama de Refino e Petroquímica no Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

[19] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Estudos prospectivos sobre oferta, demanda e usos do GLP e outros usos do gás*. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

[20] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABIQUIM). *Estudo de viabilidade do uso do etano como matéria-prima petroquímica*. Brasília: EPE; ABIQUIM, 2025.

[21] FLOUDAS, C. A. et al. Production of benzene, toluene and xylenes from natural gas via methanol process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 55, n. 3, p. 601–614, 2016.

[22] GHOLAMI, Z. et al. A review on the production of light olefins using steam cracking of hydrocarbons. *Energies*, v. 14, n. 23, 2021.

[23] LAYRITZ, L. S. et al. The potential of direct steam cracker electrification. *Applied Energy*, v. 296, 2021.

[24] MALLAPRAGADA, D. S. et al. Decarbonization of the chemical industry through electrification and

process innovation. *Joule*, 2023.

[25] OECD. *The Future of Petrochemicals*. Paris: OECD Publishing, 2018.

[26] REZENDE, L. M. *Perspectivas para a cadeia petroquímica brasileira*. 2017. Dissertação (Mestrado) – UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

[27] ZANON-ZOTIN, M. et al. Unpacking bio-based alternatives to ethylene production. *Journal of Cleaner Production*, v. 428, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139376.

Capítulo 15

Aferidor diametral automático via wi-fi e bobinador de filamentos

Rodrigo Hideki Kubo
Ludimila Kelly de Lima Moura
Joao Carlos Pereira Berto
Josefa Jakelyne Pereira de Medeiros
Lívia Maria Bezerra da Silva
Maria Eduarda Guedes dos Santos
Alexandre Magnus Fernandes Guimarães

Resumo: No presente documento, apresentamos o projeto final relacionado à disciplina de Fundamentos de Circuitos e Sistemas Controlados (ECT3511 - T01), sob a coordenação do professor Alexandre Guimarães. Basicamente, o trabalho é a produção de dois aparelhos, um dispositivo aferidor diametral, que irá utilizar interfaces computacionais para aquisição de dados e um bobinador/enrolador, com o trabalho de autoajuste de velocidade conforme a necessidade, para produção de filamentos para impressora 3D com diâmetro de $(1{,}75 \mp 0.05)\ mm$.

Palavras Chaves: Bobinador, Tracionador, Filamento, Impressão 3D.

1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A manufatura aditiva (MA) tem se destacado como uma tecnologia promissora para a fabricação de componentes personalizados com alto grau de complexidade geométrica. Essa técnica constrói objetos tridimensionais por meio da deposição sucessiva de camadas de material, sendo a modelagem por fusão e deposição (FDM) uma das abordagens mais amplamente utilizadas Impressoras 3D(IMP3D).

Com o intuito de democratizar o acesso a essa tecnologia e promover práticas mais sustentáveis, propõe-se o desenvolvimento de um sistema modular simplificado para a produção de filamentos de IMP3D, utilizando um sistema de extrusão de rosca simples, para obter filamentos de tamanho uniforme e circulares. A utilização de pellets, em vez de filamentos pré-fabricados, representa uma alternativa econômica e ecologicamente vantajosa, pois permite o reuso de materiais plásticos reciclados e a redução significativa dos custos de matéria-prima.

Por fim, a abordagem do projeto foca em um sistema de baixo custo, eliminando a necessidade de componentes complexos e caros, como sistemas de visão computacional, o que facilita sua adoção por usuários de pequeno porte.

2. METODOLOGIA

O desenvolvimento do aferidor diametral e bobinador/enrolador para produção de filamentos de impressora 3D, tem como metodologia principal a união entre componentes mecânicos e eletrônicos, permitindo a automatização da medição e o ajuste contínuo do diâmetro durante o processamento do termoplástico após a extrusão, assim obtendo um filamento adequado para o uso em todos os tipos de impressoras.

2.1. PLANEJAMENTO DO SISTEMA

Inicialmente, foi elaborado um diagrama de blocos representando a interconexão dos elementos principais do sistema: dois motores de passo, uma placa de desenvolvimento Logitech C270, e duas placas de Arduino A4988 + UNO R3 DIY para controlar os motores de passo abaixo temos as características dos dispositivos.

Tabela 1: Características dos dois motores de passo NEMA 17

Ângulo do passo	1.8º
Tensão de Operação	12 V
Corrente	0,4 A
Bobinas	2 bipolar
Resistência	30Ω por ohms
Temperatura Máxima de operação	80 °C
Torque de retenção	2,6 Kgf.cm
Diâmetro dos eixos	5 mm
Comprimento do cabo	30 cm
Comprimento do eixo exposto	21 mm
Dimensões do motor (CxLxA)	42x42x36
Peso do motor	225g

Fonte: Autoria própria

Tabela 2: Características da Webcam Logitech C270

Processador	2,4 GHz Intel Core 2 Duo
RAM	2 GB
Armazenamento	200 MB
Entrada	Porta USB 2.0
Processamento	1 Mbps ou superior
Resolução de vídeo	1280 x 720 pixels

Fonte Autoria Própria

Tabela 3: Placas de desenvolvimento Arduino A4988 + UNO R3 DIY

MCU	ATMEGA328
Interface USB	CH340
Tensão de Operação	5V
Pinos digitais O/O	14 (6 com PWM)
Corrente de saída de pinos (I-I/O)	40mA
Corrente de saída	150 mA
Memória Flash do bootlander	32 kB
RAM estática (SRAM)	2 kB
Velocidade do relógio	16 MHz

Fonte: Autoria própria

Tabela 4: Outros materiais necessários

Aparelho:	Quantidade:
Hastes metálicas (com e sem parafuso)	3
Controlador rpm	2
Cabos de conexão	6
DRM 4 pcs de 100 cm com 4 pins	2
Cabo Dados Micro USB	1
Cabo de divisor de Energia 1 para 3	1
Cabo de impressora tipo macho	1
Parafusos	10
Porcas	20

Fonte: Autoria própria

2.2. MONTAGEM MECÂNICA

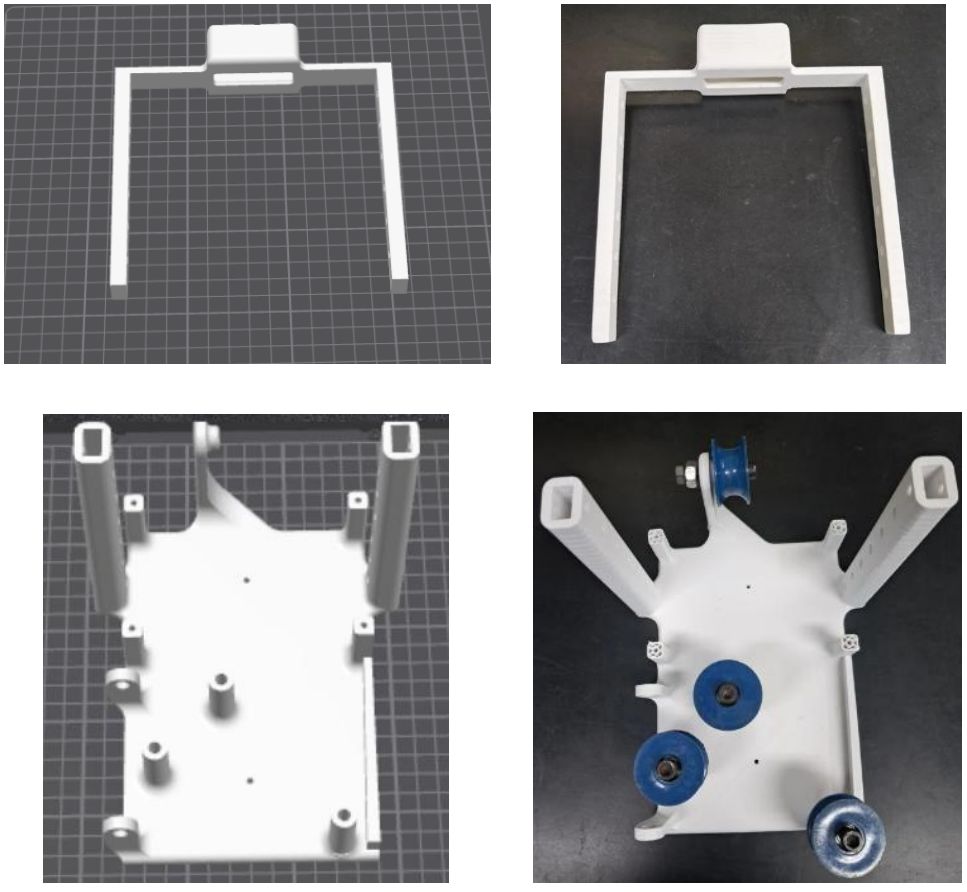
A etapa mecânica consistiu na montagem do sistema de tração e ajuste do filamento. Foi utilizado um motor de passo para realizar a tração do filamento, garantindo avanço constante e controlado, logo após o sistema de extrusão. Por fim, um segundo motor de passo foi destinado ao ajuste fino da tensão, permitindo pequenas correções dimensionais e mantendo o filamento centrado na região de medição, realizando assim o enrolamento do filamento.

O conjunto foi fixado em uma mesa parafusada para evitar todo e qualquer tipo de trepidação e desalinhamentos que pudessem interferir na precisão da aferição. O rolo de filamento foi acoplado à extremidade do sistema, armazenando o material extrudado após o processo de análise.

2.2.1. MODELAGEM STL

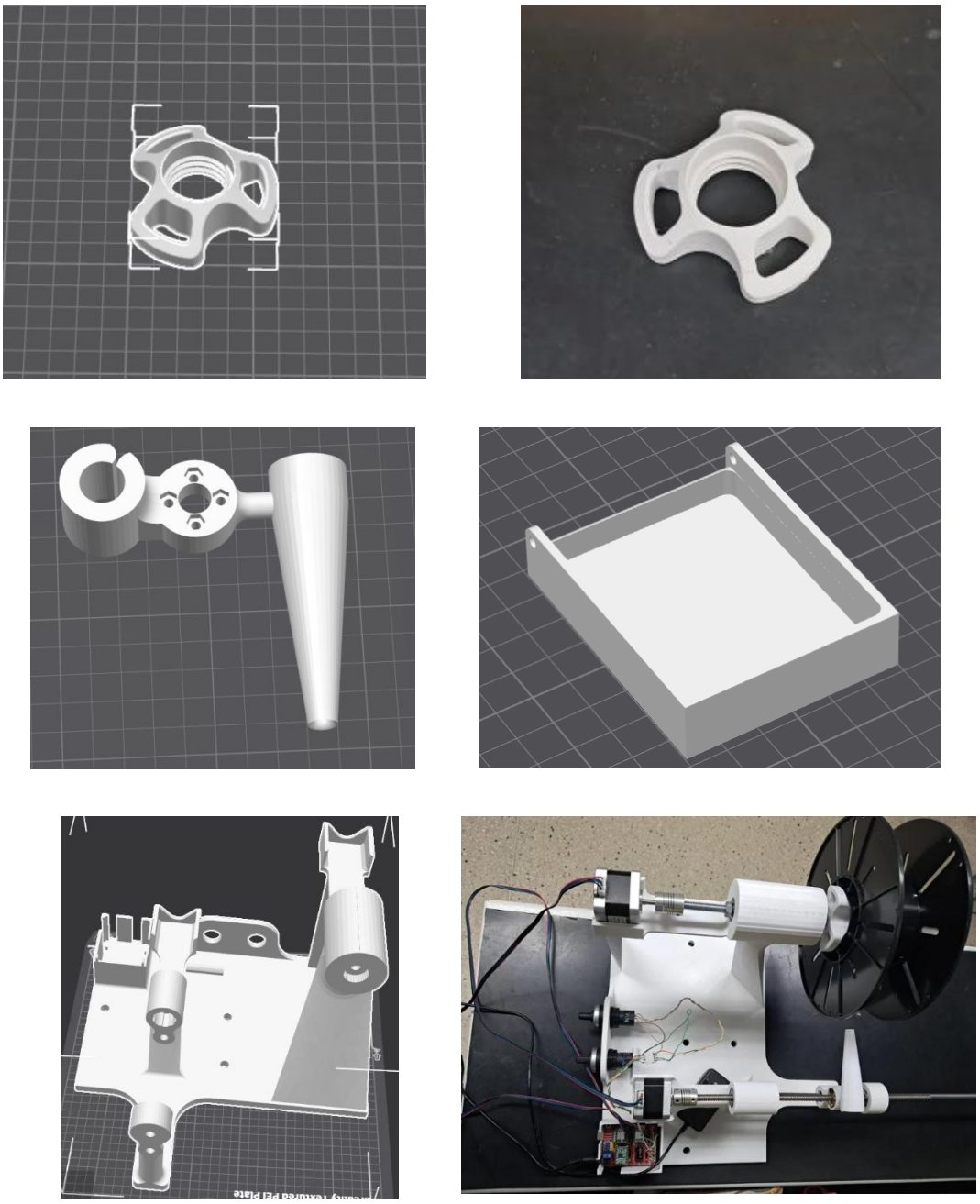
Nesta parte do trabalho, foi feito o design no aplicativo Fusion 3D, utilizado para fazer a modelagem de todas as peças para o aferidor e o bobinador, depois as peças foram formatadas em .stl no CrealityPrint, gerando o G-code para serem impressas em ABS na Creality K2 Plus Combo, utilizando o Spool holder para imprimir com 2 kg de filamentos da 3DFILA na cor ABS Branco Gesso.

Conjunto de Imagens 1: .stl do sistema aferidor diametral e impressão real



Fonte: Autoria própria

Conjunto de Imagens 2: .stl do bobinador/tracionador e impressão real



Fonte: Autoria própria

No conjunto de imagens 1 e 2 é possível perceber que a impressora K2 Plus combo, possui uma grande área de impressão de 350 x 350 x 350 mm^3, onde foi possível realizar essa grande impressão.

2.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

A Logitech C270 foi adotada como unidade de controle e aquisição de dados, devido à sua capacidade de processamento embarcado e comunicação sem fio: Capturar imagens em tempo real do filamento em movimento; Processar os dados para estimar o diâmetro

instantâneo do filamento; Enviar comandos aos motores de passo, ajustando a velocidade de tração conforme as variações detectadas.

A programação foi realizada utilizando a plataforma Arduino IDE, com bibliotecas específicas para controle de motores de passo e captura de imagens via câmera integrada. O algoritmo implementado seguiu uma rotina de leitura → processamento → correção, garantindo resposta rápida às oscilações de diâmetro.

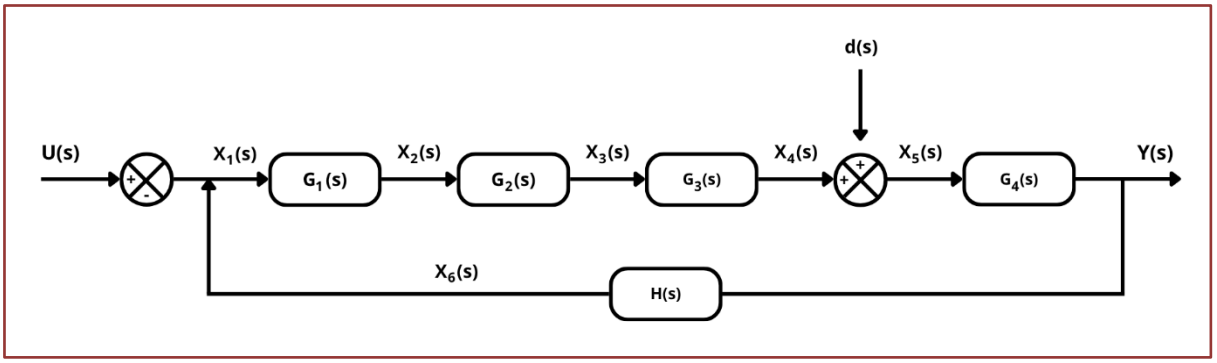
2.3.1. CÓDIGO DO ADAFRUIT E OPENCV

Nesta seção estão descritos os códigos usados no Adafruit para rodar o aferidor diametral, junto com a biblioteca OpenCV utilizada para obter mais bem dados da imagem, importante ressaltar que ambos os códigos estão no apêndice 1 e 2, devido à alta quantidade de informações presentes neles.

3. MODELAGEM E CONTROLE DO SISTEMA

Para garantir a precisão e a estabilidade do sistema de controle diametral, desenvolvemos uma modelagem do processo por meio de um diagrama de blocos em malha fechada. Este modelo, apresentado na Figura 1, não apenas descreve o fluxo de informações e as ações de controle, mas também incorpora as dinâmicas físicas de cada componente do sistema, desde o motor de tração até o processo de estiramento do polímero.

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de controle de diâmetro em malha fechada.



Fonte: autoria própria

3.1. SINAIS E COMPONENTES DO DIAGRAMA DE BLOCOS

O sistema opera seguindo um fluxo lógico de controle, onde cada sinal e bloco possui um significado físico específico dentro do projeto:

- U(s) - Diâmetro Alvo (Setpoint): É a entrada de referência do sistema, definida pelo operador. Representa o valor nominal do diâmetro que se deseja obter (ex: 1.75 mm).
- $X_1(s)$ - Sinal de Erro: Este sinal é a diferença entre o Diâmetro Alvo (U(s)) e o diâmetro real medido e realimentado pelo sensor. É a informação fundamental que guia a ação do controlador, indicando o quão longe o processo está do seu objetivo.

- $G_1(s)$ - Controlador PID: Este bloco representa o cérebro do sistema, o algoritmo de controle implementado na Logitech C270. Sua função é processar o sinal de erro e calcular uma ação corretiva apropriada. A função de transferência de um controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é:

$$G_1(s) = K_{pc} + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

As constantes são:

- K_{pc}(Ganho Proporcional do Controlador): É um parâmetro de ajuste que determina a intensidade da reação do controlador ao erro atual. Um K_{pc} alto resulta em uma resposta rápida e agressiva, enquanto um valor baixo gera uma correção mais suave.
- K_i (Ganho Integral): Este ganho atua sobre o acúmulo do erro ao longo do tempo. Sua principal função é eliminar o erro em regime permanente, garantindo que, na média, o diâmetro do filamento convirja exatamente para o valor alvo.
- K_d (Ganho Derivativo): Este ganho reage à taxa de variação do erro, conferindo um caráter preditivo ao controlador. Ele ajuda a amortecer a resposta do sistema, reduzindo o sobressinal (overshoot) e melhorando a estabilidade.

- $G_2(s)$ - Atuador (Motor de Passo): Este bloco modela a dinâmica do motor de passo NEMA 17, responsável pela tração do filamento. Ele converte o sinal de controle elétrico em velocidade mecânica. Sua resposta não é instantânea e pode ser aproximada por uma função de transferência de primeira ordem:

$$G_2(s) = \frac{K_m}{\tau_m s + 1}$$

As constantes físicas são:

- K_m (Ganho do Motor): Representa a relação estática entre o sinal de entrada (tensão/PWM) e a velocidade de saída do motor em regime permanente.
- τ_m (Constante de Tempo Mecânica): Representa a inércia do motor.

- $G_3(s)$ - Planta (Processo de Extrusão): Este é o bloco que representa o processo físico principal: a relação entre a velocidade com que o filamento é puxado e o seu diâmetro final. Esta dinâmica envolve fenômenos complexos de termodinâmica e mecânica dos fluidos. É bem modelada por uma função de primeira ordem com tempo morto (FOPDT).

$$G_3(s) = \frac{K_{pp}}{\tau_p s + 1}$$

- K_{pp} (Ganho do Processo): É uma propriedade inerente ao sistema físico, representando sua sensibilidade. Ele quantifica o quanto o diâmetro do filamento varia (em mm) para cada unidade de variação na velocidade do puxador (em RPM), após o sistema se estabilizar. Este valor é determinado experimentalmente.
- τ_p (Constante de Tempo do Processo): Representa a inércia do processo de

estiramento e resfriamento.

- d(s) - Perturbações do Processo: Esta entrada modela as variações e ruídos do mundo real que afetam o diâmetro do filamento e que estão fora do controle direto do atuador. No contexto deste projeto, as perturbações podem incluir inconsistências no polipropileno reciclado (PPr), pequenas flutuações na temperatura da extrusora ou variações na umidade do material. Um controlador robusto deve ser capaz de rejeitar o efeito dessas perturbações.
- $G_4(s)$ - Atraso de Transporte (Delay): Este é um dos elementos mais críticos do modelo. Ele representa o tempo que o filamento leva para viajar da saída da matriz da extrusora até o ponto de medição pela Logitech C270.

$$G_4(s) = e^{-sL}$$

A constante física é:

- L (Tempo Morto): É o tempo de atraso em segundos. Ignorar este fenômeno em um sistema físico real leva, quase invariavelmente, à instabilidade, pois o controlador tomaria decisões com base em informações desatualizadas.
- Y(s) - Diâmetro Real do Filamento: É a saída final e controlada do sistema, cujo valor se deseja manter constante e igual ao Diâmetro Alvo (U(s)).
- H(s) - Sensor (Aferidor Diametral): Este bloco representa o sistema de medição, composto pela Logitech C270 e pelo processamento de imagem via OpenCV. Como a velocidade de captura e processamento de imagem é significativamente mais rápida que a dinâmica do motor e do processo de extrusão, sua resposta pode ser considerada instantânea e modelada como um ganho unitário.

$$H(s) = 1$$

A modelagem detalhada de cada um desses componentes permite a simulação precisa do comportamento do sistema, a sintonia otimizada dos parâmetros do controlador PID e, consequentemente, a implementação de um sistema de controle eficaz para a produção de filamentos com alta precisão dimensional.

3.2. ANÁLISE DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DO SISTEMA

O diagrama de blocos mostra de forma visual como o controle do sistema funciona, enquanto as funções de transferência descrevem matematicamente o seu comportamento dinâmico. Quando o sistema de controle possui mais de uma entrada, como o Diâmetro Alvo $U(s)$ e as Perturbações do Processo $d(s)$, ele é analisado com base no Princípio da Superposição.

Esse princípio, aplicado a sistemas lineares, indica que a saída total do sistema é a soma das saídas que ocorreriam se cada entrada atuasse separadamente. Dessa forma, para entender completamente o comportamento do sistema, são obtidas duas funções de transferência: uma para o rastreamento do setpoint e outra para a rejeição de perturbações.

3.2.1. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE RASTREAMENTO DE SETPOINT $G_{ref}(s)$

Esta é a função de transferência primária do sistema. Ela descreve como a saída, o Diâmetro Real do Filamento (Y(s)), responde a uma mudança na entrada de referência, o Diâmetro Alvo (U(s)), assumindo que não há perturbações externas (d(s) = 0). O objetivo principal do projeto de controle é otimizar o comportamento desta função para que a resposta seja rápida, precisa e estável, garantindo que o diâmetro final do filamento seja exatamente igual ao diâmetro desejado. A função de transferência de rastreamento de setpoint é definida como a razão entre a saída e a entrada de referência:

$$G_{ref}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)H(s)}$$

Substituindo os componentes do nosso modelo, obtemos a equação completa:

$$G_{ref}(s) = \frac{\left(K_{pc} + \frac{K_i}{s} + K_d s\right)\left(\frac{K_m}{\tau_m s+1}\right)\left(\frac{K_{pp}}{\tau_p s+1}\right)e^{-sL}}{1 + \left(K_{pc} + \frac{K_i}{s} + K_d s\right)\left(\frac{K_m}{\tau_m s+1}\right)\left(\frac{K_{pp}}{\tau_p s+1}\right)e^{-sL}}$$

3.2.2. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE REJEIÇÃO À PERTURBAÇÃO $G_{dist}(s)$

Esta função de transferência é fundamental para avaliar a robustez do sistema, ou seja, sua capacidade de lidar com as imperfeições do mundo real. Ela descreve como a saída, o Diâmetro Real do Filamento (Y(s)), é afetada pelas perturbações do processo (d(s)), assumindo que o Diâmetro Alvo é mantido constante (U(s) = 0). O objetivo de um controlador bem sintonizado é minimizar o impacto desta função de transferência, fazendo com que o sistema seja o menos sensível possível a distúrbios como variações na qualidade do material ou flutuações de temperatura. A função de transferência de rejeição à perturbação é definida como a razão entre a saída e a entrada de perturbação:

$$G_{dist}(s) = \frac{Y(s)}{d(s)} = \frac{G_4(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)H(s)}$$

Substituindo os componentes do nosso modelo, a equação completa é:

$$G_{dist}(s) = \frac{e^{-sL}}{1 + \left(K_{pc} + \frac{K_i}{s} + K_d s\right)\left(\frac{K_m}{\tau_m s+1}\right)\left(\frac{K_{pp}}{\tau_p s+1}\right)e^{-sL}}$$

A análise conjunta dessas duas funções de transferência permite um projeto de controle completo. Enquanto a primeira é utilizada para garantir que o sistema siga o comando desejado, a segunda é usada para assegurar que ele mantenha esse comando de forma estável, mesmo na presença de variações e imprevistos inerentes ao processo de extrusão. Temos, então, que a saída do sistema é a soma de $G_{ref}(s)$ e $G_{dist}(s)$.

3.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A determinação dos ganhos do controlador PID (K_{pc} , K_i e K_d) é um passo crucial para garantir que o sistema de controle de diâmetro atinja um desempenho ótimo. Dois métodos práticos foram utilizados no projeto (via *Python*) para chegar a um conjunto de parâmetros eficazes: a sintonia manual e a otimização numérica via critério ITAE.

Para a simulação no ambiente de controle, os parâmetros K_m , τ_m , K_{pp}, τ_p e L foram definidos pela equipe de projeto, assumindo-se os seguintes valores para a modelagem dos blocos:

- K_m = 0,5
- τ_m = 0,1
- K_{pp} = 0,3
- τ_p = 0,2
- L = 0,05

3.3.1. SINTONIA MANUAL (OU "TENTATIVA E ERRO")

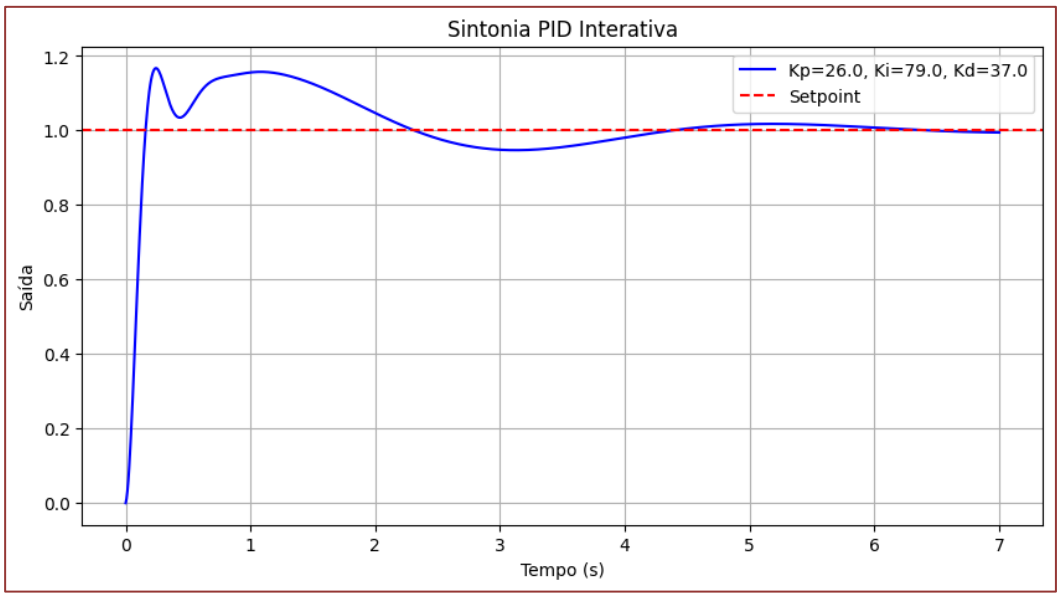
Este método representa a abordagem empírica, onde os ganhos do controlador (K_{pc} , K_i e K_d) são ajustados iterativamente pelo operador, baseando-se na observação da resposta do sistema ao degrau. O objetivo é alcançar uma resposta satisfatória, com tempo de estabilização menor que 6 segundos (com 5% de amplitude), *overshoot* menor que 20% e erro de regime nulo.

Após algumas tentativas, os valores que mais se adequaram aos parâmetros foram:

- K_{pc} = 26,0
- K_i = 79,0
- K_d = 37,0

Na Figura 2, é possível visualizar a resposta ao degrau utilizando tais coeficientes.

Figura 2 - Resposta ao degrau com os parâmetros para a função transferência obtidos por sintonia manual.



3.3.2. OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA (CRITÉRIO ITAE)

O método ITAE (*Integral of Time-weighted Absolute Error*) é uma técnica de sintonia formal que utiliza um algoritmo de minimização para calcular os ganhos ideais, garantindo um desempenho superior com base em um critério matemático.

A função de custo ITAE é definida como:

$$ITAE = \int_0^T t \cdot |e(t)|dt ,$$

onde $e(t)$ é o erro do sistema e t é o tempo. Este critério é escolhido por penalizar erros que persistem por longos períodos, incentivando uma resposta rápida e a eliminação do erro em regime permanente.

Para a implementação em *Python*, foi utilizada a função *minimize* da biblioteca *scipy.optimize* para encontrar a combinação de ganhos que resultasse no ITAE mais baixo.

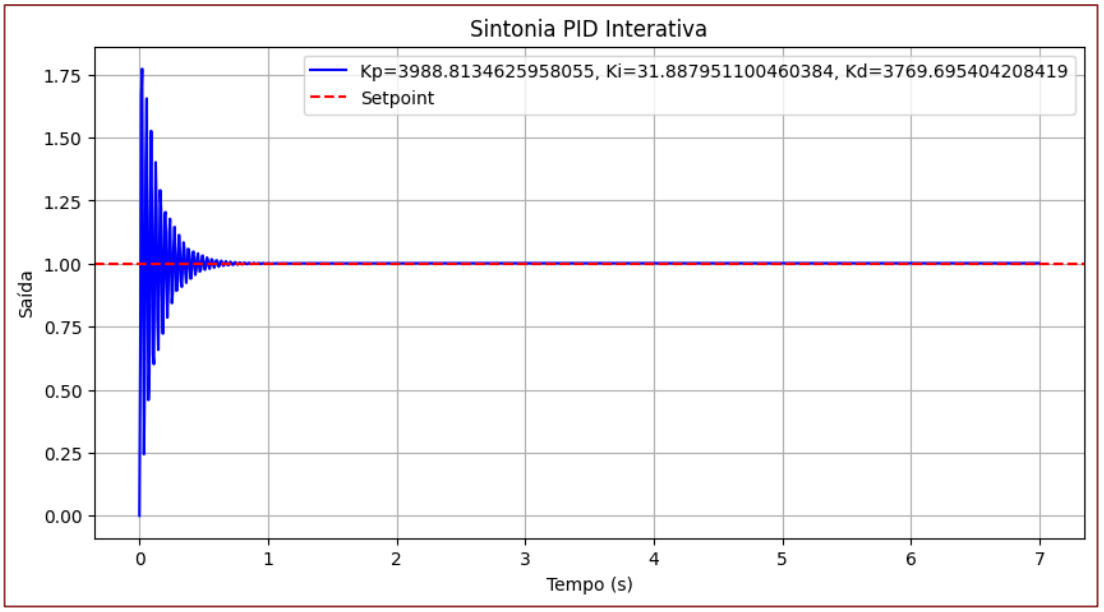
O algoritmo iniciou a sua busca a partir de valores base (K_{pc} = 1,0, K_i = 1,0 e K_d = 0,1), o que foi ajustado iterativamente.

A otimização, enfim, convergiu para os seguintes valores:

- K_{pc} = 3988,8135
- K_i = 31,8880
- K_d = 3769,6954

Na Figura 3, é possível visualizar a resposta ao degrau utilizando tais coeficientes.

Figura 3 - Resposta ao degrau com os parâmetros para a função transferência obtidos por otimização numérica.



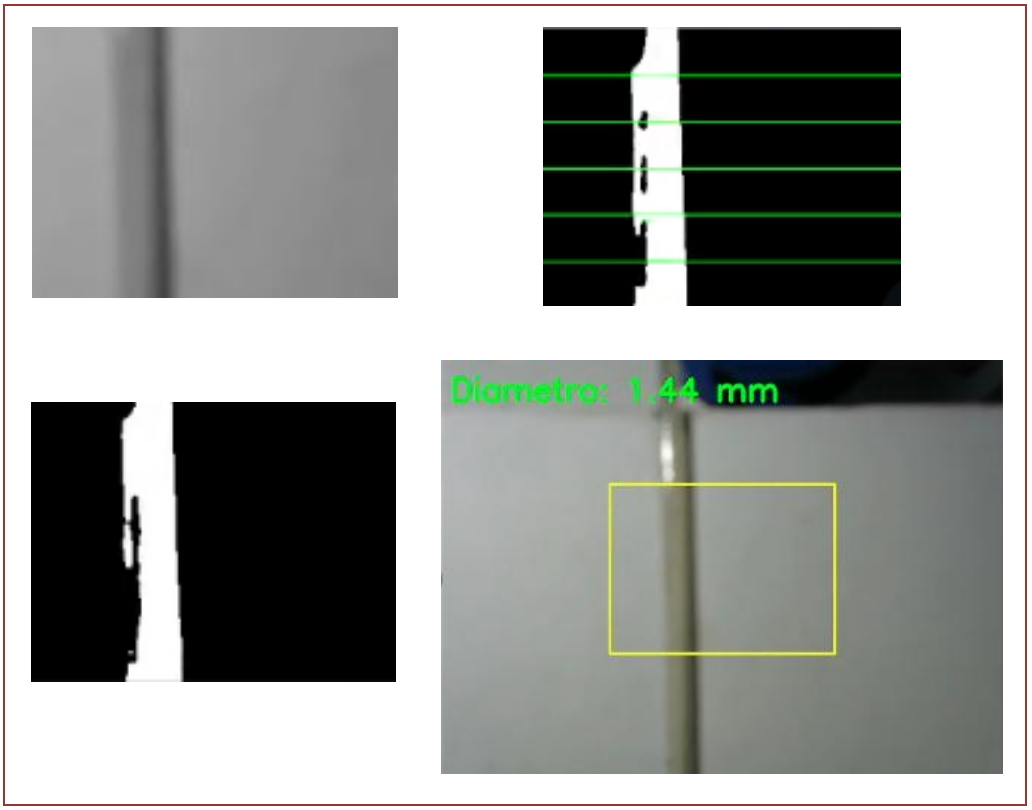
A otimização ITAE representa uma determinação formal e quantitativa, resultando em ganhos que, embora muito elevados em comparação com a sintonia manual, prometem a resposta mais rápida possível para o modelo de planta estabelecido.

Em sistemas reais, ganhos muito altos obtidos pela otimização ITAE frequentemente exigem mais potência e podem ser sensíveis a ruídos, podendo levar à instabilidade. Portanto, os resultados do ITAE servem como limite teórico de desempenho, mas na implementação final, pode-se optar por um conjunto de ganhos ligeiramente mais conservador (próximo à sintonia manual) para garantir eficiência e estabilidade do sistema em operação.

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos durante a experimentação. Durante o uso do paquímetro para aferir os dados, estava sendo marcado 1,70 a 1,80 +/- 0,05 mm de precisão, conforme o uso constante do aferidor diametral, por conta de problemas com a iluminação está atrapalhando o aferimento de dados, chegamos em aproximadamente 1,45 mm, infelizmente esse dado é bem inferior ao medido. Para atingirmos um resultado mais satisfatório, se faz necessário melhorar a prototipagem no sentido de adicionar um retroiluminado para melhorar a conexão entre código, detecção e aferimento de dados.

Conjunto de figuras 3: Imagens obtidas pela webcam



Fonte: Autoria própria

De acordo com o Conjunto de figuras 3, é nítido que é necessária uma melhor calibração do sistema, utilizando de mais dados e melhor iluminação para conseguirmos obter uma melhor medida desse filamento, que estava dentro dos 1,75 mm.

Já a máquina de enrolamento e embobinamento de filamentos de impressão, funcionou de maneira excepcional, necessitando apenas de melhoramentos na parte do puxador para aumentar a tração e melhorar o bom funcionamento.

5. CONCLUSÃO

Por fim, acreditamos que o trabalho obtido foi um sucesso, prototipagem de máquinas sempre será uma área muito difícil de sair perfeita logo nas primeiras tentativas, apenas com muitos protótipos e muita persistência é possível conseguir obter um resultado que consiga agradar todos os projetistas. Infelizmente, não conseguimos obter a melhor resolução para aferir o filamento, porém, depois de cinco tentativas de prototipagem foi obtido um resultado satisfatório para a finalização deste projeto.

REFERÊNCIAS

[1] CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[2] GHENO, S. M.; SANTOS, R. M. dos; ROSA, T. F.; MELLO, V. da S.; MELLO, V. da S. **ESTUDO DO DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE EXTRUSÃO DE FILAMENTO PARA IMPRESSÃO 3D A PARTIR DE PET RECICLÁVEIS**. SITEFA, 2024.

[3] COSTA, G. M. **Controle de diâmetro na produção de filamento para impressoras 3D**, Minas Gerais, 2015.

[4] KECHAGIAS, J. D. **Materials for Additive Manufacturing**. AIMS Materials Science AIMS Press, 2022.

Autores

AUTORES

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ADLA JAMILLY VIEIRA FELIPE

Mestranda, UFCG, Campina Grande - PB, Brasil

ADSON ANDRADE BARROS

Engenheiro Agrícola graduado pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Durante a graduação, realizou estágio com foco em automação aplicada à agricultura, incluindo desenvolvimento de painéis e bancadas didáticas, bem como utilização de sensores e softwares de controle. Participou da implementação de projetos de automação e sistemas de energia solar Off-Grid voltados para carcinicultura.

ALAN MARQUES DA ROCHA

Atualmente é doutorando na área de sinais e sistemas com linha de pesquisa em processamento de sinais e imagens pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Teleinformática do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará (PPGETI/UFC). Possui mestrado na linha de pesquisa de algoritmos e computação distribuída em Engenharia Elétrica e Computação (PPGEEC/UFC, 2024), MBA em Data Science e Analytics pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (USP/ESALQ, 2024), Pós-graduação em Inteligência Artificial e Machine Learning pela (UNOPAR, 2023) e bacharelado em Engenharia Elétrica com ênfase em computação (UFC, 2021). Cursou o ensino médio integrado em Telecomunicações no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE, 2012). Tem interesse nas seguintes áreas: Aprendizado de máquina, aprendizado profundo, reconhecimento de padrões e visão computacional.

ALANA KELLY XAVIER DE BARROS BRANCO

Doutora em Engenharia Elétrica

ALEXANDRE MAGNUS FERNANDES GUIMARÃES

Professor da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Graduado (1995 - UFRN), Mestre (1998 - UFRN) e Doutor (2009 - UFRN) em Engenharia Elétrica. Desenvolve pesquisas nas áreas de sistemas embarcados e energias renováveis

AUTORES

ALINE FIGUEIREDO DA NÓBREGA

Profª Doutoura, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC-UFCG)

ALLAN DAVID DA COSTA SILVA

Mestre em Engenharia Elétrica

AMANDA SANTANA PEITER

Doutora em Engenharia Química

ANTONIA ALANA CLAUDINO SOUSA

Possui pós graduação Lato Sensu em Ensino de Matemática pela Faculdade Ibra de Brasília - FABRAS (2022) e graduação em Licenciatura em Matemática pelo Instituto Federal do Ceará - Campus Crateús (2021). Atuou nos anos de 2021 a 2023 como professora do município de Crateús - CE na Escola de Cidadania de Santana. A partir de 2024 é Servidora Pública Municipal na cidade de Sobral. Em pesquisas e publicações, atua principalmente nos seguintes temas: currículo escolar, escola quilombola, monocórdio, teoria musical e música

ANTÔNIO LÁZARO LOBO DE ALMEIDA

Centro Universitário Jorge Amado, Campus Paralela – Salvador, BA, Brasil

CAIO OLIVEIRA XAVIER

Engenheiro de Produção formado pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

CARLOS EDUARDO RIBEIRO DA SILVA PEREIRA

Graduando em engenharia elétrica

EDILAINE DUARTE TEIXEIRA

Engenhaira de produção formada pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, com ênfase em Processo de Fabricação, atuando principalmente nos seguintes temas: desenvolvimento e caracterização de compósitos cerâmicos. Participei de quatro congressos científicos na área de Engenharia de Materiais. Realizei 3 anos de projetos de extensão na Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

ESTEVÃO DE LIMA MALTA DA SILVA

Técnico em Eletrotécnica

FRANCISCO SANTOS SABBADINI

Doutor em engenharia de produção pelo Programa de Pós-Graduação e Pesquisa (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ (2010), Mestre em Administração e Desenvolvimento Empresarial pela Unesa (2005), Especialista em Gestão da Qualidade pela Associação Educacional Dom Bosco (1998), Bacharel em Ciências Econômicas pela Associação Educacional Dom Bosco (1997). Professor nos cursos de Engenharia de Produção e de Pós-Graduação em Engenharia da Qualidade, na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

AUTORES

FREDERICO MENEZES COELHO

D.Sc. em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ (2020), M.Sc. em Engenharia Civil pela COPPE/UFRJ (2008), Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFRJ (2000) e Graduado em Engenharia Civil pela UFRJ (1997), sendo todos os títulos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atualmente, Professor adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) desde 2023 e Engenheiro chefe de análise de projetos da AGENERSA (Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro) desde 2022. Foi professor auxiliar do Centro Universitário Augusto Motta (UNISUAM) de 2014 a 2020; Engenheiro civil chefe de projetos de esgoto da CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos/RJ) de 2006 a 2016; Assistente da gerência operacional de água e esgoto da Baixada Fluminense na CEDAE de 2019 a 2021; e Coordenador de projetos e obras do PSAM (Programa de Saneamento Ambiental dos Municípios do entorno da Baía de Guanabara) de 2016 a 2019. Curriculum Lattes iD: 2224417928417957

GABRIEL NUNES FERREIRA DE ARAUJO

Estudante de Graduação, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

IGOR CAVALCANTE TORRES

Doutor em Energia

JHENNIFER LARISSA DE BARROS SILVA

Estudante de Graduação, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

JOÃO CARLOS PEREIRA BERTO

Graduando no Bacharelado em Ciências e Tecnologia na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2021-2025). Desenvolve pesquisa na área de degradação de polipropileno

JOÃO RICARDO DE ANDRADE MACHADO

Centro Universitário Jorge Amado, Campus Paralela – Salvador, BA, Brasil

JORGE DAVID ALGUIAR BELLIDO

Possui graduação em Engenharia Química - Universidad Nacional de Ingenieria (1999), mestrado em Química (Química Analítica) pela Universidade de São Paulo (2004), doutorado em Ciências, área de concentração em Química (Fisico Química) pelo Instituto de Química de São Carlos/Universidade de São Paulo (2008), Com estudos de pos-doutorando na Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor adjunto do curso de Engenharia Quimica no campus Alto Paraopeba da Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais. Tem experiência na área de Química, com ênfase em catálise Heterogênea,

JOSEFA JAKELYNE PEREIRA DE MEDEIROS

Graduada em Bacharelado em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2021–2025), com pesquisa na área de nanocatalisadores aplicados a eletrodos de baterias de fluxo redox de vanádio

JOSÉ NILTON VIEIRA DOS SANTOS JÚNIOR

Graduando em engenharia elétrica

AUTORES

LISBETH ZELAYARAN MELGAR

Professora Dra. da Universidade Federal de São João del Rei no curso de Engenharia Química.

LÍVIA MARIA BEZERRA DA SILVA

Graduada no Bacharelado em Ciências e Tecnologia na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2022-2025). Desenvolve pesquisa na área de astrofísica estelar

LUDIMILA KELLY DE LIMA MOURA

Graduada no Bacharelado em Ciências e Tecnologia na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2021-2025). Desenvolve pesquisa na área de nanomateriais para produção de hidrogênio verde

LUIS GUSTAVO FIGUEIREDO FRANÇA

Possui graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (2011). Mestrado (2014) e doutorado (2017) em Engenharia Agrícola com ênfase em Construções Rurais e Ambiência Animal pela Universidade Federal de Viçosa, especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho (2014) pela Universidade Federal de Viçosa. É Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Sergipe. Participa do Núcleo de pesquisa em Ambiência e Engenharia Agroindustrial (Ambiagro) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Participa do "Grupo de estudos em engenharia agrícola (GEAGRI)" da Universidade Federal de Sergipe além dos grupos de pesquisas "Ambiência e instalações na produção animal" e "Estruturas, sistemas e processos para manejo tratamento de resíduos agroindustriais", ambos sediados no Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Atualmente é vice-chefe do DEAGRI/UFS vice coordenador do curso de Engenharia Agrícola da UFS e presidente do NDE da Engenharia Agrícola da UFS. É membro da Comissão Coordenadora do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Cientifica (COMPIBIC) da UFS. Faz parte do Banco de Avaliadores do Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior (BASis) do Inep.

MARCOS VINÍCIUS LOPES PEREIRA

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação (2003), mestrado em Engenharia Elétrica (2006) e doutorado em Administração (2020), todas essas obtidas na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é professor adjunto Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), Campus Alto Paraopeba, atuando, principalmente, nos cursos de Engenharia Mecatrônica e Engenharia de Telecomunicações. Tem experiência na área de Engenharia de Controle e Automação, e possui os seguintes áreas de interesse: controle de processos industriais, processamento de sinais, identificação de sistemas dinâmicos, otimização de sistemas e inteligência computacional (redes neurais e sistemas nebulosos).

MARIA EDUARDA DO NASCIMENTO SOUTO

Engenheira Civil, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

MARIA EDUARDA GUEDES DOS SANTOS

Graduanda em Bacharelado em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, (2022-2025). Desenvolve pesquisas nas áreas de Modelagem e Processamento de Materiais Didáticos Acessíveis e de Estudo e Processamento de Ligas Metálicas, com foco em aplicações em órteses e próteses

MARIA EDUARDA MENEZES EVANGELISTA

Graduação em Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil

AUTORES

MÁRIO CUPERTINO DA SILVA JÚNIOR

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2004), mestrado e doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2006 e 2010), com estágio de doutoramento na Universidade de Valladolid, em Valladolid, Espanha (2008-2009). Atualmente, está se especializando em Energias Renováveis pela UFMG e é professor Associado na Universidade Federal de Sergipe. Tem experiência e interesse em Automação de Processos e Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: Automação Agrícola, Energias Renováveis e Processamento Digital de Imagens.

MATHEUS HORTA DE PAULA

Engenheiro Mecatrônico formado pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Participou de vários projetos de iniciação cientifica envolvendo Automação de Processos e Redes Industriais. Foi Bolsista IC-IT CNPq (Chamada PIBITI - FUNTTEL). Atua nas áreas de robótica, automação e redes industriais de computadores. Também possui vasta experiência de trabalho na área de informática. Atualmente é Senior Development Analyst na Solinftec onde dedica-se à criação de soluções inteligentes para a Agricultura, unindo experiências prévias com sistemas de informática e a formação tecnológica.

MELISSA DA SILVA LEITE

Graduação em Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil

MICHEL CARLO RODRIGUES LELES

Professor Associado da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, em que está lotado no Departamento de Tecnologia (DTECH/CAP/UFSJ). Engenheiro de Controle e Automação pela Universidade Federal de Minas Gerais. Possui Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma instituição. Docente nos Programas de Pós Graduação em: i) Ciência da Computação (PPGCC/UFSJ); e ii) Pesquisa Operacional (PPGPO/ITA-UNIFESP). Tem interesse na grande área de Data Science, especialmente na análise de séries temporais, processamento de linguagem natural, e finanças computacionais.

NARA SILVEIRA VELLOSO

Possui graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (2014), mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2016) e doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (2020). É professora no departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Sergipe. Tem experiência na área de Engenharia Agrícola, com ênfase em Máquinas e Implementos Agrícolas, atuando principalmente nos seguintes temas: propriedades físicas de produtos biológicos, vibrações mecânicas e simulações numéricas.

PRISCILA MARIZ SANTANA ALVES

Aluna de graduação da Universidade Federal de São João del Rei no curso de Engenharia Química.

RAYANNA NATHIELY SILVA NASCIMENTO NOGUEIRA

Graduação em Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil

RIAN CAMPOS ALMEIDA

Estudante de Graduação, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

AUTORES

RODRIGO HIDEKI KUBO

Graduando em Ciências e tecnologia com ênfase em Materiais (2021- 2025), Iniciação Científica na área de Produção e Caracterização de Membranas de Poliamida-6 com cinzas de Carvão vegetal (2022-2023) e atualmente, trabalho no LABPOL com desenvolvimento de materias termoplásticos para impressão 3D (2024-2025)

RONALDO COSTA SANTOS

Químico Bacharel, Mestre em Físico-Química, Doutor em Engenharia Química e Pos Doc em Engenharia Química pela Universidade Federal da Bahia. Junto a Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO) foi coordenador executivo no Projeto de Reforma do Ensino Médio na Bahia. Na Universidade de Tecnologia e Ciências (Rede UNIFTC), como Diretor de Pós-Graduação e Inovação, desenvolveu e coordenou cursos de Graduação e Pós-Graduação nas modalidades presencial, semi-presencial e ensino a distância (EaD). Como docente, lecionou disciplinas na áera de Termodinâmica, Físico-Química e Inorgânica. Membro conselheiro do Conselho Regional de Química CRQVII, secção Bahia. Na pesquisa, vem desenvolvendo projetos na área de catálise heterogênea, com ênfase em petróleo, petroquímica, transformação de biomassa e meio ambiente, atuando principalmente nos seguintes temas: reações, catalisadores, combustíveis, biocombustíveis, energia e ambiente.

VERONA SILVA BENEVIDES

Centro Universitário Jorge Amado, Campus Paralela – Salvador, BA, Brasil

WILLIAM DE PAIVA

Professor de Magistério Superior, UFCG, Campina Grande-PB, Brasil

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson